مقدمة في فيزياء النجوم

تأليف
الدكتور مجدي يوسف أمين
أستاذ الكيمياء الفلكية وعلم الفلك بجامعة القاهرة

المقدمة

بسم الله الذي رفع السماء بلا عمد، وبسط الأرض وهيأ الحياة فيها، فالحمد له حمد من يستحق الحمد، حمداً يليق بجلال وجهه وعظيم سلطانه. والصلاة والسلام على خاتم رسله وصفوته من خلقه سيدنا ونبينا محمد عليه أفضل الصلاة وأزكى التسليم.

لفت الله تعالى نظر الإنسان في محكم التنزيل للتطلع إلى السماء ونجومها، والتفكر في هذا الملكوت العظيم ودقة وكمال خلقه وعظمته، ليزداد المؤمن إيمانا. ومنذ أن تطلع الإنسان إلى السماء لفتت نظره بنجومها المتلألئة وحركتها المتتابعة المنتظمة، وتعاقب الليل والنهار، وحركة الشمس في السماء، وتغير مواقعها فيها من حين لآخر وارتباط ذلك بفصول السنة. ولاحظ أيضاً ظواهر الكسوف والخسوف، وما شاهده من مذنبات وشهب ونيازك. فطرح بذلك الأسئلة الكثيرة، وكانت مجال تفكيره ودراسته. فعلم الكون بلا شك من أقدم العلوم إن لم يكن أولها. فقد وُلِد في اللحظة التي نظر فيها الإنسان إلى السماء. فهو بحق الجد الأعظم لكل العلوم. ومن يتطلع لدراسته سوف يتبين له أمثلة عديدة، إن دلت على شئ فإنما تدل على عظمة الخالق عز وجل وقدرته سبحانه وتعالى.

لقد هيأت أرصاد النجوم وحسابات النماذج النجمية للفلكيين مفاهيم حول تطور النجوم. حيث تولد النجوم في السديم أو سحب المظلمة للوسط البين نجمي ، المكون من غاز وغبار الموجود بوفرة في مجرتنا ، كرد فعل لبعض الأحداث مثل التصادم مع أحد الأذرع الحلزونية للمجرة ، أو التصادم مع هبات النجوم فوق الجديدة supernova ، ومن ثم تبدأ السحابة في الانكماش تحت تأثير جاذبيتها. وينشأ الضغط في النجم الجنيني ليقاوم الانكماش الذي يحدث بسقوط الطبقات الخارجية للنجم الجنيني على القلب. يحدث هذا حتى يأتي وقت تصل فيه درجة حرارة القلب إلى الحد الذي يشتعل فيه الهيدروجين ، وهنا يبدأ ميلاد النجم. لقد وضع هينيني في عام 1950 أول نموذج لوصف المراحل المبكرة للنجم الجنيني.

النجوم هي أجرام سماوية منتشرة بالسماء الدنيا تزينها وتجلب في النفس السكينة والخشوع لله سبحانه وتعالي. تخيل لو أن السماء لا يوجد بها أي نجم فإن الليل سوف يكون مخيف. وصدق الله العظيم حينما يقول **" ولقد زينا السماء الدنيا بزينة الكواكب"** . وكان يطلق على النجوم في القدم أسم الكواكب الثابتة. والنجوم عبارة عن كرات غازية، ملتهبة، مضيئة بذاتها، متماسكة بقوة الجاذبية على الرغم من بنائها الغازي، ذات كتل هائلة و الحجم كبيرة. وهي عبارة عن مفاعلات نووية تنتج بداخلها الطاقة مما يجعلها تعيش بلايين السنين.

ويتعرف الإنسان على خواص النجوم عن طريق الضوء الذي تشعه في جميع الأطوال الموجية. وقد تطور استخدام الإنسان للنجوم حسب تطور العقل البشري فمنهم من كان يعبدها ومنهم من استخدمها في معرفة الزمن ومنهم من استخدمها في معرفة الاتجاهات الجغرافية ومنهم من استخدمها في معرفة الأحوال الجوية ، فيما يعرف بالأنواء وهكذا حتى وصلنا إلى العصر الحديث والذي تستخدم فيه النجوم

لمعرفة القوانين الطبيعية التي وضعها الله في الكون وكيفية الاستفادة منها في حياتنا الحديثة ، وصدق الله العظيم حينما يقول " **وبالنجم هم يهتدون**".

وفي هذا الكتاب أتناول بالتفصيل العوامل الفيزيائية التي تتم في جميع مراحل تشكيل وحياة وتطور النجوم على اختلاف أنواعها ، حتى يتثنى لطلاب ودارسي علم الفلك والفيزياء الفلكية إيجاد مخطوط باللغة العربية يتناول هذا الموضوع.

وفي الحقيقة بدأت فكرة هذا الكتاب من قول رسول الله صلى الله علية وسلم " **إذا مات العبد أنقطع عملة إلا من ثلاث ، صدقة جارية أو علم ينتفع به أو ولد صالح يدعوا له** " راجياً من الله أن يتقبل هذا العمل والمجهود في سبيله.

المؤلف

في الأول من محرم

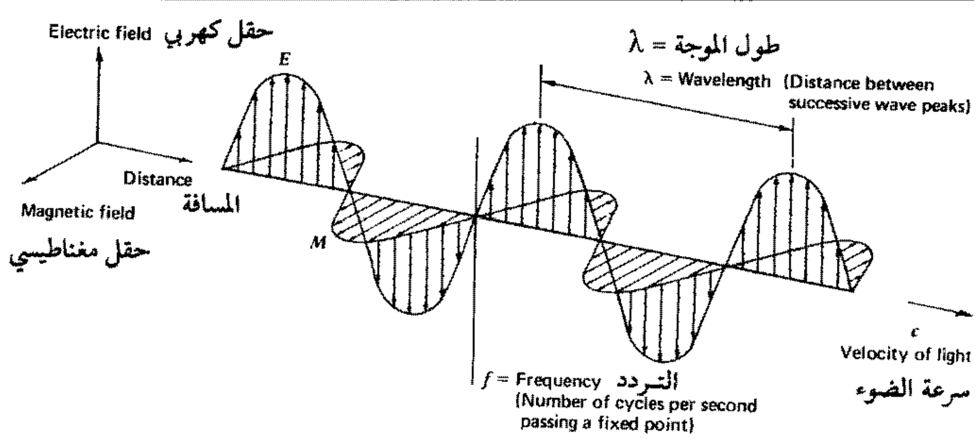
1428هـ

الفصل الأول

الإشـــعـــــاع

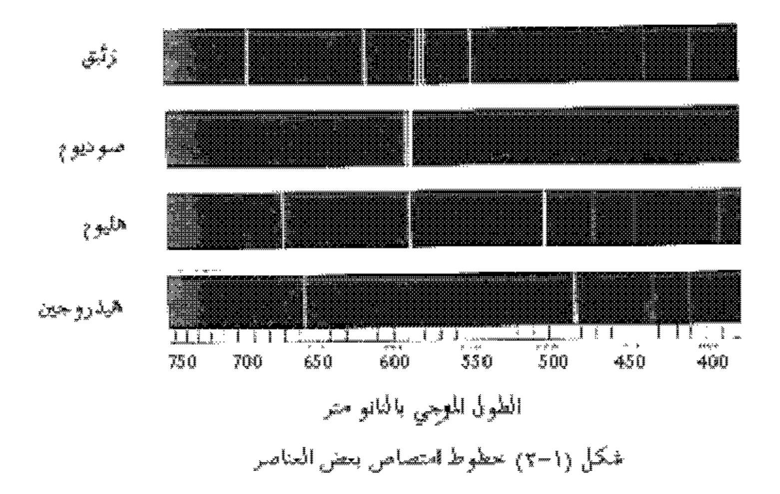
1-1 مقدمة

إن الوسيلة الوحيدة لدراسة أجرام السماء ، هي ما تبعث به هذه الأجرام من رسائل تتمثل في الموجات الكهرومغناطيسية electromagnetic بمختلف أطوالها wave length في كافة الاتجاهات .ومعظم هذه الموجات غادرت الجرم الذي بعث بها منذ مدة تتراوح من ثماني دقائق للموجات القادمة من الشمس إلى آلاف بل ملايين السنين للموجات القادمة من النجوم و المجرات البعيدة. والموجات الكهرومغناطيسية هي إشعاع يتكون من حركتين اهتزازيتين متوافقتين تتحركان في مستويين متعامدين مصدر الأول حقل كهربائي والآخر مغناطيسي يشكلان معا حقلا كهرومغناطيسيا . وتتحرك الطاقة الكهرومغناطيسية بشكل دالة الجيب sine function بشكل متناسق مع سرعة الضوء حسب الشكل (1-1) ،حيث تسمى المسافة بين قمة موجة كهرومغناطيسية والقمة التي تليها بطول الموجة ، وتسمى عدد القمم المارة بنقطة ثابتة في الفضاء في وحدة الزمن (ثانية) بالتردد (f) frequency .وسرعة تلك الموجات في الفراغ تساوي 300 ألف كم /ث ،وهي ما يطلق عليه سرعة الضوء ،وتسير في خطوط مستقيمة ما لم تقع تحت تأثير مادي يحيد من مسارها .



شكل (1-1) مسار الموجات الكهرومغناطيسية

والموجات الكهرومغناطيسية لها خاصتان الأولى تفسر على أنها جسيمات كمية أي فوتونات تبعاً لنظرية نيوتن. وفي هذه الخاصية يمكن اعتبار الضوء على أنه تياراً من كتل ذات طاقة معينة. وتعتبر هذه الخاصية مهمة في فهم كيفية امتصاص المواد العضوية



شكل (١-٢) خطوط امتصاص بعض العناصر

والخاصية الثانية تفسر على أنها موجيه تبعا لنظرية بلانك. وتبعا لقانون بلانك فإن طاقة الفوتون تساوي $E = hf$ ، حيث h هو ثابت بلانك ويساوي $6.62x10^{-27}$ جم سم^2 /ث .

2-1 مكونات الموجات (الأطياف) المغناطيسية

يتكون الطيف الكهرومغناطيسي من خلال تفاعل الموجات الكهرومغناطيسية مع المواد . فعند مرور الضوء خلال مجموعة من الغازات أو الجزيئات فإن الضوء الخارج لايكون مستمراً ، اذ أن بعض الموجات تتحد مع الذرات أو الجزيئات وتُمتص من قبلها ، وبذلك يتهيج (يثار) الجسيم من مستوى طاقة منخفض إلى مستوى طاقة أعلى. ويطلق على هذة العملية بطيف الإمتصاص . ويعطى كل نوع مختلف من الذرات أو الجزيئات طيف امتصاص مميز له. أما طيف الانبعاث فإنة ينشأ عندما يفقد الجزئ أو الذرة طاقته وبذلك تنتقل طاقة الجسيم من مستوى طاقة أعلى إلى مستوى طاقة منخفض.

وفي الجزيئات يعتبر العدد الكلى لمستويات الطاقة كبير جداً لذا فإن الطاقة الكلية تنقسم إلى أنواع حسب المعادلة التالية :

$$E_{total} = E_{translation} + E_{nuclear\ oreintation} + E_{rotation} + E_{vibration} + E_{electronic.} \qquad (1-1)$$

حيث أن $E_{translation}$ هي الطاقة الانتقالية ، و $E_{nuclear\ oreintation}$ الطاقة الاتجاهية النووية ،و $E_{rotation}$ طاقة الدوران ، و $E_{vibration}$ طاقة الاهتزاز، و $E_{electronic}$ الطاقة الالكترونية.

ويعتمد تحديد طاقات الحركة المميزة للجزئ على الفراغ المتوفر لتلك الحركة. فإذا كان الفراغ كبيراً فإن التحديدات تكون قليلة التمييز للطاقة. ويمكن لطاقة هذا النوع من الحركة أن تأخذ أي كمية على المقياس المستمر لذلك فإن دراسة تغييرات الطاقة في مثل هذه الأنواع من الحركة تعتبر ذات أهمية قليلة. أما إذا كان الفراغ محدداً فإن المستويات الكمية للحركة تعتبر ذات أهمية في دراستها. ويمكن توضيح الأنواع المذكورة من الطاقة كما يلي :

1- الطاقة الانتقالية

وتُعزى هذه إلى الحركة الحرة للجسيمات في الفراغ. وتكون مستويات الطاقة للجزيئات مختلفة ومتزايدة بدون حدود. ويمكن للذرة أو الجزئ أن يمتص أي كمية من الطاقة عند انتقاله من موضع لآخر. ويعتبر هذا النوع من أنواع الطاقات ذات أهمية قليلة من الناحية الكمية ويعامل بالوصف التقليدي. وتعطى الطاقة بالمعادلة الآتية :

$$E_{translation} = \frac{1}{2} mv^2 \qquad (1-2)$$

حيث أن m هي كتلة الجزيئات و v سرعتها.

2- الطاقة الإتجاهية النووية

تعتبر هذه الطاقة مهمة عند دراسة الجزيئات الحاوية على نوى تمتلك لفاً نووياً ذاتياً وتعتمد على توجهات النواة.

3- طاقة الدوران

وهي الطاقة الحركية التي تمتلكها الجزيئات بسبب دورانها حول إحداثي معين خلال مركز الجاذبية. وتكون طاقة الدوران الجزيئية كمية quantized أما المسافات الفاصلة بين مستويات الطاقة للجزيئات الخفيفة (في الطور الغازي) فهي بحدود 10^2 cal. $Gram^{-1}$ mol^{-1} .

4- طاقة الاهتزاز

وتمثل طاقة الجهد والطاقة الحركية التي تمتلكها الجزيئات بسبب حركتها الإهتزازية ، ويمكن اعتبار الذرات في الجزيئات كأنها كتل متمركزة متماسكة مع بعضها بواسطة أواصر تعمل عمل اللولب ، وذلك لأن الجزيئات ليست صلبة وإن حركتها الإهتزازية تنتج بسبب مرونتها (انثنائيتها).

5- الطاقة الإلكترونية

وهي الطاقة التي تمتلكها الجزيئات كنتيجة لطاقة الجهد والطاقة الحركية لإلكتروناتها. وتنتج الطاقة الحركية للإلكترونات نتيجة الحركة ، أما طاقة الجهد فإنها ناتجة من اتحاد الإلكترون مع النواة و إلكتروناتها.

ويستعمل اصطلاح الطيف الكهرومغناطيسي لوصف مجالات الأشعة القصيرة والمتوسطة والطويلة ،وقد قسم إلى مجالات أو موجات طيفية (نطاقات) متصلة كما في جدول الآتي .

نوع الإشعاع		الطول الموجي			العدد الموجي cm^{-1}	التردد Hz	الطاقة $Cal.mol^{-1}$
		انجشترو م	ميكرو متر	سم			
[illegible]	طويل الموجة	10^{14}	10^{10}	10^{6}	10^{-6}	$3x10^{4}$	10^{-6}

	قصير الموجة	10^{12}	10^{8}	10^{4}	10^{-4}	$3x10^{6}$	10^{-4}
	التليفزيون	10^{10}	10^{6}	10^{2}	10^{-2}	$3x10^{8}$	10^{-2}
	الرادار	10^{8}	10^{4}	1	1	$3x10^{10}$	2.85
المايكروويف		10^{7}	10^{3}	10^{-1}	10	$3x10^{11}$	28.5
تحت الحمراء	البعيدة	10^{6}	10^{2}	10^{-2}	10^{2}	$3x10^{12}$	285
	تحت الحمراء						
	القريبة	10^{4}	1	10^{-4}	10^{4}	$3x10^{14}$	28.5
الضوء المرئي		$4x10^{3}$			$24x10^{3}$	$75x10^{13}$	71.4
الفوق بنفسجية		$3x10^{3}$			$3.2x10^{4}$	10^{15}	96
أشعة أكس		1	10^{-4}	10^{-8}	10^{8}	$3x10^{18}$	10^{8}
أشعة جاما		10^{-2}	10^{-6}	10^{-10}	10^{10}	$3x10^{20}$	10^{10}
الأشعة الكونية		10^{-4}	10^{-8}	10^{-12}	10^{12}	$3x10^{22}$	10^{14}

وتتشابه كل هذه الموجات في طبيعتها وتتبع المبدأ الأساسي في التحرك الموجي وتختلف في أطوالها الموجية ،ولا يوجد حدود فاصلة بين مجالات الموجات الكهرومغناطيسية ، ومن الممكن تجزئة المجال الطيفي الواحد إلى مجالات جزئية. وتختلف الخواص الكيميائية والفيزيائية للأنواع المختلفة من الإشعاع ، ويمكن فهم هذا الاختلاف بدلالة الطاقات المختلفة للفوتون. ولتوضيح ميكانيكية الاتحاد بين الإشعاع الساقط والتغيرات الجزيئية أو الإلكترونية يجب أن يكون هناك تأثيراً كهربائياً أو مغناطيسياً ينتج بالتغيرات التي تتأثر بالمجال الكهربائي أو المغناطيسي المرتبط بالإشعاع. ويمكن توضيح تأثير امتصاص الأنواع المختلفة من الإشعاع الكهرومغناطيسي على الجزيئات ابتداءً من المنطقة الأقل طاقة إلي المنطقة الأعلى طاقة كما يلي :

أ-الموجات الراديوية Radio waves:

هي أطول تلك الموجات حيث تصل أطوالها لعدة كيلو مترات . وعندما تمر تلك الموجات بموصل هوائي تحدث تياراً ضعيفاً يمكن تكبيره وتسجيله. ويمكن للشعاع ذو الطول الموجي 1مم و 20مم اختراق الغلاف الجوي الأرضي ليصل إلينا . أما الموجات الأقصر من ذلك فإنها تمتص بواسطة ذرات وجزيئات الجزء السفلي من الغلاف الجوي الأرضي ، بينما الموجات الأطول من ذلك يعكسها الأيونوسفير ثانية في الكون ،بحيث لا تصل إلى سطح الأرض. في النطاق الراديوي يستعمل في الغالب عدد الذبذبات في الثانية بدلا من طول الموجة. وكلا القيمتين ،طول الموجة والذبذبة تربطهما العلاقة :

$$\lambda = c / \nu \qquad (1-3)$$

حيث c هي سرعة الضوء .وكوحدة للذبذبة يستعمل في الغالب الميجاهرتز ، وواحد ميجاهرتز يساوي مليون ذبذبة لكل ثانية.

والإشعاع الراديوي عبارة عن جزئين : الجزء الأول عبارة عن إشعاع حراري ، فكل جسم يبعث بإشعاع كهرومغناطيسي يتناسب مع درجة حرارته. وبنقص درجة الحرارة تقل كذلك الطاقة المنبعثة ، وتتزحزح مع ذلك المنطقة ذات الإشعاع الأكبر ناحية الموجات الأطول (سوف نشرح هذا في قوانين الإشعاع). من هنا فإن جسماً في درجة حرارة الغرفة لا يشع في النطاق البصري ، يمكن بأن يبعث بأشعة راديوية محسوسة.

وينشأ الإشعاع الراديوي الحراري في مناطق تحتوي غاز ما بين النجوم ،الذي يوجد فيه الهيدروجين متأيناً ، وكذلك من السدم الكوكبية والمجموعة الشمسية.

أما الجزء الآخر من الإشعاع فهو غير حراري وينبعث هذا أثناء تذبذب البلازما فإذا ما أزيحت الإلكترونات السالبة بالنسبة للأيونات الموجبة بقوة ما في البلازما (أي في غاز متأين) فإن قوة الجذب تعمل كقوة معاكسة وتؤدي إلى الذبذبات . وينشأ هذا الإشعاع في مجموعة سكة التبانة (اللبانة) والسدم الإنبعاثية الكثيفة والمجموعة الشمسية.

ب- المايكروويف Microwave :

يتراوح الطول الموجي في هذه المنطقة بين واحد سنتيمتر إلى مائة ميكرو متر. وحيث أن طاقة الفوتون في هذه المنطقة صغيرة جداً ، لذا يمكن للفوتونات أن تنبعث في هذه المنطقة نتيجة الانتقال بين مستويات الطاقة الدورانية فقط. ويحصل الامتصاص عند ترددات معينة تُحدّد بواسطة عزم القصور الذاتي للجزيئات الغازية. ويستفاد من أطياف

ج-الموجات الحرارية (تحت الحمراء) Infrared:
وهذه الأشعة تتراوح أطوالها الموجية بين 7×10^{-4} mm إلى 1mm .ويمكن تصوير ما تقل أطواله عن 15×10^{-4} مم بألواح خاصة فوتوغرافية مكونة من خلايا كبريتات الرصاص .أما الموجات الأطول من ذلك فتسجل باستخدام أجهزة فلكية مكونة من أنصاف الموصلات الكهربائية التي تحول الشعاع الملتقط إلى إشارة كهربية مباشرة.
والإشعاع تحت الأحمر لا ينفذ كلياً من خلال الغلاف الجوي ولكن بصورة جزئية نتيجة لامتصاص بخار الماء H_2O وثاني أكسيد الكربون CO_2 ومنبع موجات تحت الحمراء في السماء هي النجوم الباردة جدا وكذلك النجوم التي في مرحلة التكوين ، حيث وجود الجزيئات الكيميائية.
وفي منطقة تحت الحمراء يدرس الأطياف الناتجة من الانتقال بين مستويات الطاقة التذبذبية للجزيئات. أما في منطقة تحت الحمراء البعيدة يدرس الأطياف الناتجة من دوران الجزيئات. وفي منطقة الأشعة تحت الحمراء القريبة تكون طاقة الكم التي يمتصها الفوتون كبيرة نسبياً بحيث يمكن أن تحصل انتقالات اهتزازية إضافة إلى الانتقالات الدورانية ، وتكون الأطياف في هذه المنطقة معقدة جداً بسبب تداخل الانتقالات الدورانية مع الانتقالات الاهتزازية.

د-الضوء المرئي Visible Light:
هو إشعاع مرئي في الأطوال الموجية من 4000 إلى 8000 أنجستروم ،وفي المعنى المجازي تعتبر الموجات الكهرومغناطيسية الأطول والأقصر من تلك القيم كذلك ضوء ، وإن كانت هاتين المنطقتين غير مرئيتين. والعين البشرية لا ترى كل هذا النطاق ولكنها ترى في حدود 3800 إلى 7600 أنجستروم وتسمى هذه الأطوال الموجية بالأشعة المرئية. وتبلغ حساسية العين أكبر قيمة لها عند 5500 أنجستروم الذي يناظر لون الطيف الأصفر. وتكون طاقة هذه المنطقة كبيرة ($35\text{-}70 \ cal \ mol^{-1}$) بحيث يمكن للإلكترونات الخارجية لبعض الجزيئات أن تتهيج إلى مستويات الطاقة العليا ويحتمل أن تحصل تغيرات كيميائية.

هـ- الأشعة فوق البنفسجية Ultraviolet:

هي منطقة من الطيف تتصل بالجزء البنفسجي قصير الموجة من الطيف البصري. والإشعاع فوق البنفسجي غير مرئي وموجاته أقصر من حوالي 4000 أنجستروم وتمتد حتى حوالي 100 أنجستروم. وتكون طاقة الفوتون الكمية في هذه المنطقة كبيرة ، بحيث يمكن للإلكترونات الخارجية للجزيئات أن تتهيج إلى مستويات الطاقة الأعلى وفي بعض الأحيان يحصل تأيناً. ويمكن الكشف عنها بالتصوير الفوتوغرافي أو بالفوتومترات.

هي أشعة كهرومغناطيسية مثل الضوء ، إلا أن موجاتها أقصر منه بكثير ، وهذه الأشعة غير مرئية وأطوال موجاتها محصورة بين 100 و 0.01 أنجستروم. وتكون الطاقة في هذه المنطقة عالية جداً بحدود آلاف أو ملايين الكيلو سعرات Kcal لكل مول mol ، وهذه الطاقة تعتبر كافية لإزالة الإلكترونات الأقرب إلى النواة.

ز- أشعة جاما Gama rays :

هي أشعة قصيرة الموجة جداً ، حيث يقل طولها الموجي عن 0.01 أنجستروم. وفي هذه المنطقة يدرس أطياف انتقالات الطاقة بين مستويات بعض النوى. وتتميز إنبعاثات أشعة جاما بأنها حادة جداً.

وكلاً من الأشعة السينية وأشعة جاما تسمى أشعة رونتجن Roentgen. ونظراً لأن الغلاف الجوي الأرضي غير منفذ للموجات الأقصر من 3000 أنجستروم تقريبا، فأن أشعة رونتجن يمكن رصدها بواسطة البالونات والصواريخ والأقمار الصناعية وسفن الفضاء.

وعندما تزيد درجة حرارة الأجسام على سطح الأرض عن الصفر المطلق ، والذي يساوي سالب 273 درجة مئوية ،تُصدر تلك الأجسام إشعاعات كهرومغناطيسية بشكل مستمر ، وبكميات تتعلق بدرجة حرارة الجسم وخواصه التركيبية . وقد اتضح أن إشعاع جسم ما يزيد كلما ازدادت قدرته على الامتصاص ، ويحدث اتزان حراري thermal equilibrium بين تلك الأجسام والوسط المحيط بها عندما تتساوى كمية الحرارة الممتصة في الوسط المحيط مع كمية الإشعاع المنبعث من الجسم للوسط.

ومن تلك الملاحظات استطاع العلماء وضع قوانين فيزيائية تصف الإشعاع المنبعث والممتص بواسطة الأجسام. وقبل أن نتكلم عن قوانين الإشعاع سوف نذكر خواص الإشعاع

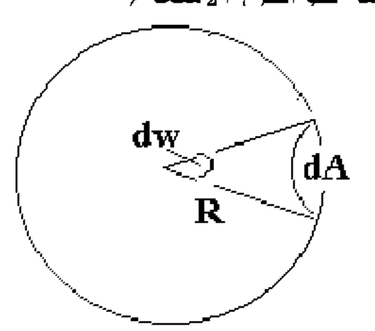
3-1 خواص الإشعاع

عرفنا سابقاً أن الإشعاع لا يخرج في اتجاه معين بل ينتشر في جميع الاتجاهات ، وهذا يؤدي إلى دراسة الزاوية المجسمة solid angle قبل دراسة خواص الاشعاع

الزاوية المجسمة: هي الزاوية المركزية dw التي تقابل الجز dA على سطح دائرة نصف قطرها R كما في شكل (1-3) هندسة هذا الشكل نجد أن :

$$dw = dA/R^2 \qquad (1\text{-}4)$$

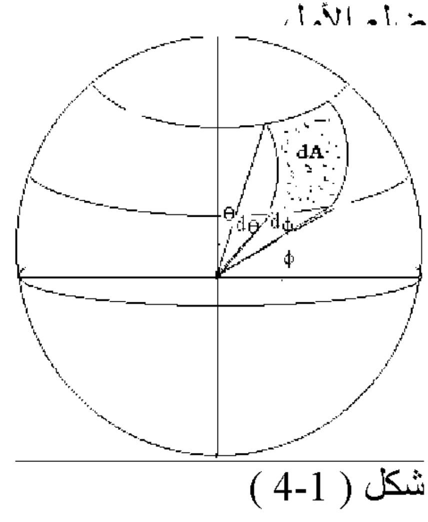
وفي الإحداثيات الأفقية – الرأسية dA=dx*dy ، أما في الإحداثيات الكروية فإن



شكل(1-3)

$$dA=R^2\sin(\theta)d\phi d\theta \qquad (1\text{-}5)$$

وهذا لأن المساحة dA كما يتضح من الشكل (1-4) ل ة العظمى الرئيسية والضلع الآخر على الدائرة الصغرى. الضلع الأول يصنع الزاوية θ مع الرأسي. والزاوية المحصورة بين هذا الضلع والضلع الواصل إلى ملتقى الضلعين تسمى dθ. وعلى هذا فطول الضلع الرأسي هو Rdθ. والضلع الآخر يصنع زاوية قدرها ϕ مع الأفقي ، وقيمته بدلالة البعد R هو Rsin(θ) ، وبذلك يصبح طول هذا الضلع Rsin(θ)dϕ. ومن المعادلة (1–4) و (1- تصبح الزاوية المجسمة $dw = \sin(\theta)d\phi d\theta$



شكل (1-4)

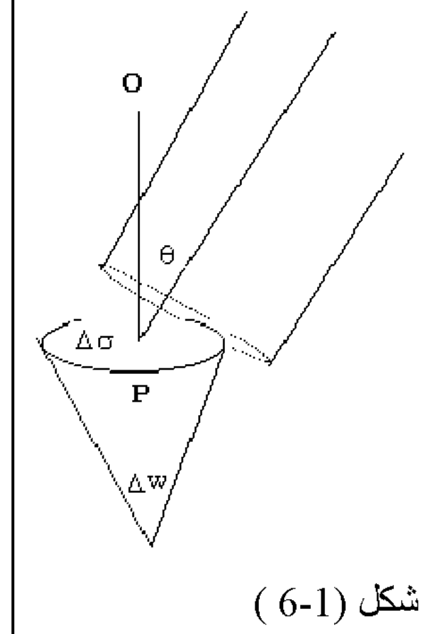
شكل (1-5)

وللإشعاع عدة خواص هامة في الفلك وهي :

1-الاتجاه : بفرض معرفة الطول الموجي ومدى التردد لمصدر ط وعند النظر إلى هذا المصدر من بعد معين ، لابد من الأخذ في الا الاتجاه. ذلك لأن كثيراً من الأوساط التي يمر بها الضوء لا تكون م ولمعرفة الاتجاه لابد قياس الضوء من اتجاه محددة reference frame ولبيان أهمية الاتجاه ، نفرض أن مصدر ضوئي P ذات مساحة $\Delta\sigma$ تردد $\Delta\nu$ في زمن قدرة Δt ، عمودي على اتجاه الراصد O كما في (1-5). وأن هذه المساحة تصنع زاوية مجسمة مقدارها Δw.

فتكون كمية الطاقة الإشعاعية الخارجة من هذا المصدر هي

$$\Delta E = I \, \Delta t \, \Delta w \, \Delta\nu \, \Delta\sigma \qquad (1\text{-}6)$$



شكل (1-6)

وفي حالة أن المصدر يميل على الاتجاه OP بزاوية قدرها كما في شكل (1-6) فإن

$$\Delta E = I \, \Delta t \, \Delta w \, \Delta\nu \, \Delta\sigma \cos(\theta) \qquad (1\text{-}7)$$

من المعادلة (1-4) و (1-5) نجد أن كمية الطاقة الإشعاعية على مجموعة من العوامل وهي Δw و θ . بالنسبة إلى θ نج الطاقة الإشعاعية تكون أكبر ما يمكن في الاتجاه العمودي. لـــ Δw فإنها لا تؤثر فيه حتى لو آلت إلى الصفر ، لأن الإش لا يحدث له تفرق أو انتشار على مساحات أوسع ، وبالتالي شدته. وبهذا تصبح ΔE غير معتمدة على المسافة وهذه حقيق جداً ، ومنها فإن لمعان الشمس مثلاً إذا نظرنا إليها من زحل يكون هو نفس لمعانها لو نظرنا إليها من الأرض.

2- شدة الإشعاع : عند النظر إلى مصدرين للإشعاع على نفس المسافة والاتجاه من الراصد نستطيع أن نميز أيهما أكثر لمعاناً من الآخر عند تساوي سطحيهما. في الشكل (1-7) النقطة P يصلها إشعاعات في المدى الترددي $\Delta\nu$ من مصادر شتى داخل الزاوية المجسمة

$$I_v = \lim_{\Delta v,\Delta \varsigma,\Delta w,\Delta t \to 0} \left\{ \Delta E_v / (\Delta v \Delta \sigma \Delta w \Delta t) \right\} = d(E_v)/d(t)d(w)d(v)d(\sigma) \quad (1\text{-}8)$$

أو

$$I_v = \lim_{\Delta v,\Delta \varsigma,\Delta w,\Delta t \to 0} \Delta E_v / (\Delta v \Delta \sigma \Delta w \Delta t \cos(\theta)) = d(E_v)/\{d(t)d(w)d(v)d(\sigma)\cos(\theta)\} \quad (1\text{-}9)$$

ومن المعادلة (1-6) و (1-7) وبالتكامل على سطح كرة نجد أن تحسب الشدة المتوسطة J_v

$$J_v = 1/(4\pi) \int_{sphere} I_v(x, \theta) d w \quad (1\text{-}10)$$

وهذا يعني أنه إذا اجتمعت الأشعة على العنصر المساحي من اتجاهات شتى دخولاً وخروجاً أصبح للزاوية المجسمة Δ أهمية من نوع معين تؤدي بنا إلى ما يعرف بالفيض .

بفرض أن الاتجاه المحدد للقياس هو الاتجاه العمودي كما هو موضح بالشكل (1-7) ، وهو الذي يتم منه قياس زوايا ميل الإشعاع. فعندما يميل العنصر المساحي $\Delta\sigma$ على الاتجاه العمودي تصبح مساحته $\Delta\sigma\cos(\theta)$ ، وبالتالي يعرف الفيض flux على أنه هو كمية الإشعاع في المدى الترددي Δv التي تعبر العنصر المساحي $\Delta\sigma$ من الداخل إلى الخارج أو العكس. أي إذا كان الإشعاع صادر من مركز النجم إلى الخارج عابراً العنصر المساحي $\Delta\sigma$ فإنه محدد بالزوايا $90 \to 0 \leftarrow 90$ يميناً ويساراً من الاتجاه الأساسي.

ويحسب الفيض عند النقطة P في الشكل (1-5) كما يلي :

$$\Delta F_v = \Delta E_v / (\Delta v \Delta \sigma \Delta t) \quad (1\text{-}11)$$

ومن المعادلة 6 في المعادلة 8 نجد أن

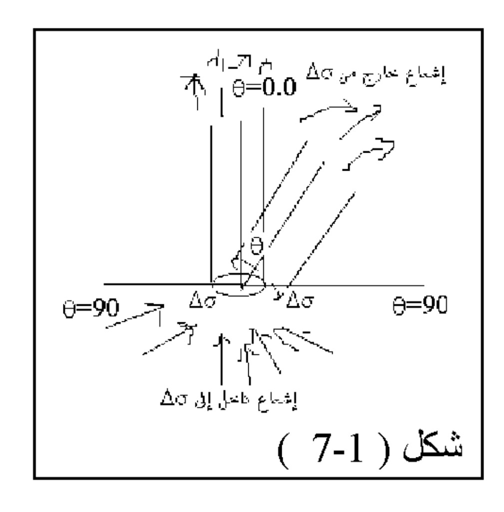
$$\Delta F_v = I_v \cos(\theta) \Delta w \quad (1\text{-}10)$$

بتكامل المعادلة (1-11) نجد أن كل الإشعاع الذي يعبر العنصر المساحي $\Delta\sigma$ إلى الخارج محصور بين $\theta=0$ و $\theta=90$ ويعطى بـ

$$F_v^{+}(x) = \int_{outward} I_v \cos(\theta) dw \quad (1\text{-}13)$$

بينما الإشعاع العابر للعنصر المساحي $\Delta\sigma$ من الخارج إلى الداخل يعطى بـ

$$F_v^{-}(x) = \int_{inward} I_v \cos(\theta) dw \quad (1\text{-}14)$$



شكل (7-1)

ومن المعادلة (1-13) و المعادلة (1-14) يكون الفيض الكلي net flux هو

$$F_\nu(net) = F_\nu^{+}(x) - F_\nu^{-}(x) = \int I_\nu \cos(\theta)\, dw \qquad (1\text{-}15)$$

من هذه المعادلة نجد أن الفيض يعتمد على المسافة حيث قيمة الزاوية المجسمة dw تنقص كلما زادت المسافة بين الراصد والمصدر الضوئي. وأيضاً إذا كان الإشعاع متناظر isotropic فإن الفيض الكلي يساوي صفر.

3- الاستقطاب : في الظروف الطبيعية تكون اهتزازات الأمواج الضوئية متعامدة على اتجاه الحركة أو الانتشار ، وشدة الموجة تتناسب مع سعتها ، وكمية طاقتها تتناسب مع مربع السعة. إذا أستمر اتجاه التذبذب ثابتاً بالنسبة لاتجاه الحركة على طول الانتشار فإن الشعاع يطلق علية صفة الاستقطاب في مستوى . وإذا دارت المركبة الكهربية للشعاع في الفضاء بشكل لولبي بالنسبة لاتجاه الانتشار فأن الشعاع يطلق علية صفة الاستقطاب الدائري.
وعندما يسقط الضوء على وسط يتكون من غازات وجزيئات ، فإن إلكترونات الجزيئات أو الذرات في ذلك الوسط تمتص الضوء ثم تشع جزءاً منه. إن امتصاص وإشعاع الضوء من قبل الوسط يسمى تشتت أو استطارة ، وهذا هو الذي يجعل ضوء الشمس الواصل من أعلى إلى المشاهد على سطح الأرض مستقطباً جزئياً.

4-امتصاص وانبعاث الإشعاع :بفرض طبقة من المادة سمكها dx وشدة الإشعاع الساقط عليها مقدارها I_v^o ولقد وجد أن كمية الطاقة الممتصة بواسطة تلك المادة تقدر بـ

$$I_v = I_v^o \exp\{-\int d\tau\} \qquad (1\text{-}16)$$

حيث τ تسمى العمق الضوئي optical depth ، و تعتمد على كثافة المادة ρ وكذلك سمكها و معامل الامتصاص k_v لكتلة تلك المادة ، و تساوي

$$\tau_v = \int k_v \rho \, dx \qquad (1\text{-}17)$$

وفي حالة انبعاث الإشعاع من تلك المادة فإن كمية الطاقة المنبعثة تساوي

$$F_v = 4\pi j_v \, dv \, dm \, dt \, dw \qquad (1\text{-}18)$$

حيث j_v معامل انبعاث الإشعاع لتلك المادة.

وتكون كمية الطاقة المنبعثة بالنسبة لوحدة الزاوية المجسمة هي

$$F_v / dw = 4\pi j_v \, dv \, dm \, dt \qquad (1\text{-}19)$$

1- 4 تأثيرات الغلاف الجوي الأرضي

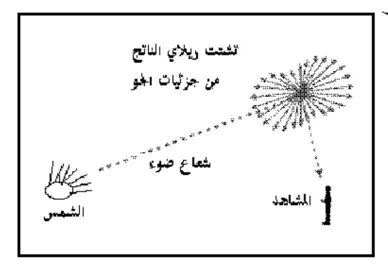
تمر الأشعة الكهرومغناطيسية خلال الغلاف الجوي عبر مسافات يطلق عليها المسار في الجو. وتتأثر جميع الأرصاد الفلكية بالغلاف الجوي ، فيتغير الضوء الواصل إلينا من الأجرام السماوية في شدته وتركيبه الطيفي بواسطة الانكسار والاستبعاد والتألق ، أثناء سيره في جو الأرض.

تختلف نفاذية الغلاف الجوي باختلاف طول الموجة. والأشعة ذات الطول الموجي الأقصر من 3000 أنجستروم يتم امتصاصها بواسطة جزئ الأوكسجين O_2 وغاز الأوزون O_3 .فإذا ما أردنا رصد الأجرام السماوية في هذه الموجات فإن ذلك يستلزم الارتفاع لأكثر من مائة كيلومتر عن سطح الأرض. والغلاف الجوي منفذ للموجات في الحيز من 3000 إلى 10000 أنجستروم. وهذا النطاق الطيفي الذي يضم المنطقة القريبة من فوق البنفسجي والطيف البصري وتحت الأحمر ، ويسمى بالنافذة البصرية. ويعتبر الغلاف الجوي منفذاً بالنسبة للإشعاع ذي الموجات الطويلة من بضع مليمترات إلى عشرين متر. وفي هذا الحيز يتم أخذ الأرصاد الراديوية ، ويسمى لذلك بالنافذة الراديوية. أما الموجات الأطول من ذلك فتنعكس على الطبقة المتأينة من طبقة الأيونوسفير ، التي تمتد من 80 كم إلى 500 كم في الارتفاع من سطح الأرض ، وهي لذلك لا تصل إلى سطح الأرض.

يؤثر أيضاً الغلاف الجوي في شدة وتركيب الطيف الكهرومغناطيسي للإشعاعات المختلفة ، ويظهر هذا التأثير من خلال ميكانيكية التشتت أو التناثر scattering.

والتشتت : هو تناثر للإشعاعات لا يمكن توقعه ، يحدث بفعل الجزيئات الموجودة في الجو ، ويمكن تمييز ثلاثة أنواع من التشتت :

تشتت ريلاي : هذا النوع من التشتت Rayleigh scattering هو



الأكثر حدوثاً ، ويحصل هذا عندما تصطدم الإشعاعات مع جزيئات الجو

والجزيئات الصغيرة ذات الأقطار الأصغر من أطوال موجات الأشعة المتداخلة ، ويلاحظ أن الأشعة ذات الطول الموجي القصير تتشتت بصورة أكبر من الأشعة ذات الطول الموجي الطويل بهذه الآلية ، وأوضح دليل على ذلك لون السماء الأزرق الناتج من تداخل أشعة الشمس مع جزيئات الجو وتشتت الأشعة الزرقاء الأقل طولا ، بينما يصبح لون السماء مائلا إلى الأحمر أو البرتقالي عند الغروب والشروق إذ تنتقل حينها أشعة الشمس ضمن مسار أطول فيحدث تشتت للأشعة ذات الأمواج القصيرة بشكل كامل ويظهر لون الأمواج الأطول الأقل تشتتاً. ويعتبر هذا النوع من التشتت من الأسباب الرئيسية لظاهرة الضباب hazz التي تظهر في الصور وتقلل من وضوح الرؤية والتمييز بين النجوم. ويتم التخلص منها باستعمال مرشحات خاصة filters تركب على العدسات لتمنع مرور الأمواج قصيرة الطول.

ولقد وجد ريلاي أن شدة الأشعة بعد التشتت تعطى بـ

$$I=I_o \{ 8N\pi^4\alpha^2/R^2\lambda^4\}(1- Cos^2\theta) \qquad (1-19)$$

حيث N عدد الجزيئات المسببة للتشتت و α معامل الاستقطاب و λ الطول الموجي الساقط و R المسافة بين المشاهد وطبقات الجو و θ الزاوية بين الشعاع الساقط والشعاع المستقطب (اتجاه المشاهد). ومن هذه المعادلة نجد أن شدة الأشعة المتشتته تعتمد على الأس الرابع للطول الموجي الساقط

- تشتت مي : يحدث هذا النوع من التشتت Mie scattering عندما تكون أقطار الجزيئات الجوية مساوية لأطوال موجات الأشعة التي تصطدم بها. ومن الأسباب الرئيسية لهذا التشتت جزيئات الغبار وبخار الماء H_2O العالقة في الجو. ويؤثر هذا التشتت في الموجات الطويلة.

-التشتت غير الانتقائي: يحدث هذا النوع nonselective scattering عندما تكون أقطار الجزيئات المسببة للتشتت أكبر بكثير من أطوال موجات الأشعة الكهرومغناطيسية. والمثال على ذلك التشتت الناتج بفعل قطرات الماء التي يتراوح قطرها بين خمسة إلى مائة ميكرومتر ، والتي تشتت كل الأمواج المرئية وتحت الحمراء بشكل متساوٍ تقريبا. وهذا يعني أن هذا التشتت ليس انتقائيا حسب طول الموجة.

5-1 القوانين الفيزيائية الخاصة بالإشعاع

ذكرنا سابقاً أن طيف كل جسم يعتمد على تركيبه الكيميائي ، لذلك عرف العلماء ما يسمى بالجسم الأسود black body المثالي ، الذي يمتص تماما كل ما يسقط عليه من إشعاع ويبعث بإشعاع أكثر من أي جسم آخر على نفس درجة حرارته (أي يطلقها ثانية بالكامل). وبذلك استطاع العلماء وضع قوانين تصف الحالة المثالية للإشعاع.

القانون الأول

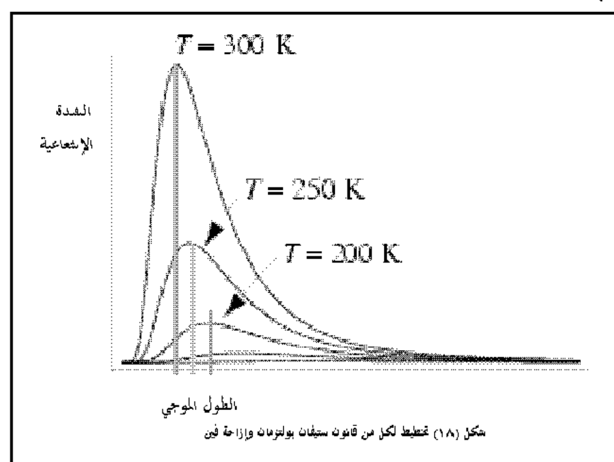
قانون ستيفان بولتزمان Boltzman Stephan Law الذي يعطي

1- العلاقة بين الطاقة (أو الإشعاع) التي تنبعث 1سم^2 من سطح النجم والأس الرابع لدرجة الحرارة المطلقة T^4.

$$W=\sigma T^4 \qquad (1\text{-}20)$$

حيث σ هي ثابت ستيفان - بولتزمان ويساوي

$1.2\text{x}10^{-9}$ rg/cm^2.sec.deg^4



شكل (١٨) تخطيط لكل من قانون ستيفان بولتزمان وإزاحة فين

2- الطاقة الحقيقية (الكلية) للإشعاع (أي مجموع طاقة الإشعاع في كل طيف) التي تنطلق من كل سطح النجم وتسمى الضياء أو النورانية أو اللمعان الحقيقي ، تساوي

$$L=4\pi\sigma R^2T^4 \qquad (1\text{-}20a)$$

حيث R نصف قطر سطح النجم.

ويوضح شكل (1-8) تخطيطاً للقانون ، لعدد من الأجسام السوداء المثالية في تصرفها الإشعاعي في درجات حرارة مختلفة. فكلما ازدادت درجة حرارة الجسم المشع زادت كمية الطاقة المنطلقة منه. ويلاحظ أن المنحنيات تبدي انحرافا باتجاه أطوال الموجات القصيرة ، إذ يتعلق طول الموجة للجسم المشع عند الذروة بالتحديد بدرجة الحرارة ، والذي يعبر عنة القانون الثاني.

القانون الثاني

قانون إزاحة فين Wien's displacement والذي يعطي العلاقة بين طول الموجة عند درجة إشعاع طيفي قصوى wave length at maximum spectral radiation ودرجة الحرارة المطلقة.

$$\lambda_m = A / T \qquad (1\text{-}21)$$

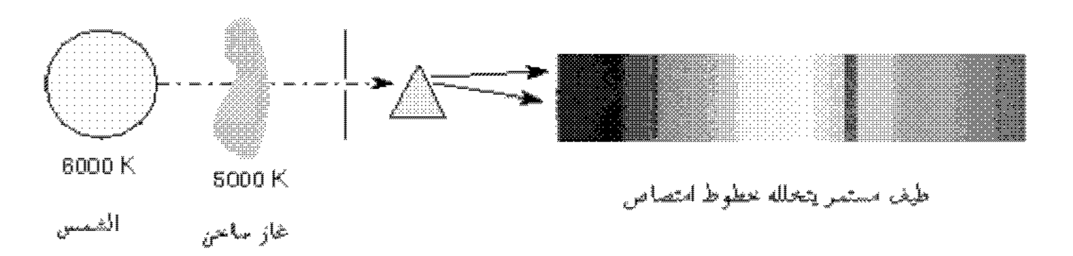
حيث A ثابت يساوي 2898 ميكرو متر. وبهذا يتبين أن طول الموجة الذي يحدث أقصى كمية من الإشعاع الطيفي للموجات الكهرومغناطيسية يختلف من جسم إلى آخر حسب التركيب الكيميائي للجسم.

وحيث أن الشمس والنجوم تعتبر أجساماً سوداء مثالية لأنها تشع موجات في مختلف الأطوال ، فمن القانون الأول والثاني بعد رصد كمية الإشعاع الصادر من النجوم وبعد تصحيحه نتيجة لما يفقده من طاقة خلال مساره في الغلاف الجوي يمكن معرفة درجة الحرارة الفعالة لسطح النجم ولون الشعاع المميز للنجم وبالتالي تركيبه الكيميائي.

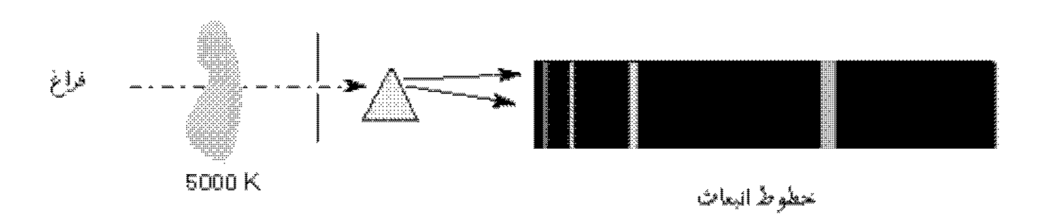
القانون الثالث

قانون كيرشوف Kirchoff ، الذي يعطي العلاقة بين طيف المواد و الخواص الفيزيائية لتلك المواد من ناحية درجات الحرارة والكثافة كما في شكل (1-9). ولقد توصل كيرشوف إلى ثلاثة قوانين تصف طيف المواد :

- طيف الأجسام الصلبة أو السوائل أو الغازات ذات الكثافة العالية ، حينما نرفع درجة حرارتها، يتكون من طيف مستمر لامعbright continuous spectrum.
- طيف الغازات المخلخلة حينما نرفع درجات حرارتها يتكون من خطوط طيفية إنبعاثية emission spectral line
- إذا جئنا بغاز مخلخل ووضعناه أمام مادة صلبة أو سائلة أو غازية ذات كثافة عالية ، وكانت درجة حرارة الغاز أقل من درجة حرارة تلك المادة ، فإن الطيف الناتج يتكون من الطيف المستمر اللامع الناتج من تلك المادة ، بالإضافة إلى خطوط طيفية ماصة absorption spectral line والتي تماثل تماما خطوط الغاز المخلخل اللامعة التي تظهر لو وضعنا الغاز فقط أمام جهاز الطيف.



أنواع الأطياف الخطية معتمدة على درجة حرارة الغاز والوسط المحيط به



شكل (١ – ٩) تطبيق قانون كيرشوف على الشمس

تفسر قوانين كيرشوف الثلاثة كل أطياف الأجرام السماوية ، حيث تطلق الشمس وبقية النجوم إشعاعاً مستمراً يعزى إلى غاز تحت ضغط عالي ودرجة حرارة مرتفعة (القانون الأول). ويوجد في طيف الشمس وبعض النجوم خطوط طيف امتصاص طبعت على الطيف المستمر ، وتميز عناصر بعينها ، مما يدل على أن باطن النجوم الساخن محاط بغلاف من الغازات الباردة نسبياً التي تسبب الامتصاص (القانون الثالث). أما خطوط الطيف اللامعة (القانون الثاني) فقد وجدت في أطياف كثير من النجوم والسحب الغازية لمادة ما بين النجوم الساخنة والمذنبات وغيرها.

القانون الرابع

تشكك بلانك في قانون تساوي توزيع الطاقة $E=kT$ وعدم ارتباطه بالتردد ، ومن ثمَ فقد افترض أن قانون تساوي توزيع الطاقة الحرارية بين الذبذبات الموجية equipartation of thermal energy لا لزوم له في حالة إشعاع الجسم الأسود. بمعنى أن الطاقة لابد وأن تكون

$E_v = h\nu / \{ \exp(h\nu/kT) - 1\}$ (1-22)

ومن ثمَ أمكن لبلانك حساب عدد الفوتونات N التي تنبعث من أي جسم ساخن في طول موجي (أو تردد معين) معين بمعرفة القدرة power المتوسطة المتولدة من ذلك الجسم ، عن طريق

$N= P/E_v$ (1-23)

حيث E_v طاقة الجسم عند التردد المعين.

القانون الخامس

ظاهرة دوبلر :يتأثر الطول الموجي لخط الطيف المرصود بالحركة النسبية بين النجم والمشاهد، طبقاً للعلاقة الآتية $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_o$ ، حيث λ_o هي الطول الموجي لخط الطيف للجسم الثابت أو المقاس في المعمل و λ هي الطول الموجي المرصود لخط الطيف عندما يتحرك الجسم. وتكون مقدار الإزاحة بين الطولين الموجيين هي $\Delta\lambda$. فإذا كان النجم مقترب من المشاهد فإن الخطوط تنزاح نحو الموجات الأقصر طولاً حتى تصل إلى اللون الأزرق ، وتسمى هذه العملية بالإزاحة نحو الأزرق وتكون قيمة $\Delta\lambda$ سالبة. أما إذا كان النجم يتحرك بعيداً عن المشاهد فإن الخطوط تنزاح نحو الموجات الأطول حتى تصل إلى اللون الأحمر ، وتسمى في هذه الحالة بغلإزاحة الحمراء، وتكون قيمة $\Delta\lambda$ موجبة. ومن العلاقة السابقة يمكن حساب سرعة النجم من العلاقة

$V = c[\Delta\lambda/ \lambda_o]$ (1-24)

مثال 1- أعلى شدة للموجات لضوئية الصادرة من الشمس هي للون الأصفر-البرتقالي ذو الطول الموجي 500 nm ، أحسب درجة حرارة الشمس.

الحل

$\lambda_m = 0.2898\text{x}10^{-2} / T$

$T=0.\ 2898\text{x}10^{-2} / 500\text{x}10^{-9} = 5796\ K$

مثال 2- إذا كانت كمية الطاقة التي تسقط عمودياً على مساحة 1سم^2 في الثانية خارج جو الأرض تساوي 1.37 مليون إرج/ث.سم^2 . ما هو ضياء الشمس.

الحل

ضياء الشمس $L= 4\pi\sigma R^2T^4 = (1.37x10^6)x(4x3.14x(150x10^{11})^2) = 3.8x10^{33}$ erg/sec

حيث R تساوي الوحدة الفلكية بالسنتيمتر

مثال 3- من معرفة قيمة الثابت الشمسي ، أحسب قيمة الطاقة الكلية المنبعثة من سطح الشمس في الثانية الواحدة. إذا كان نصف قطر الشمس يساوي 690 ألف كم. ثم أحسب درجة حرارة سطح الشمس

الحل

$L= 4\pi\sigma R^2T^4 = (1.37x10^6)x(4x3.14x(690x10^8)^2) = 8.2x10^{28}$ erg/sec

$T=[W/\sigma]^{1\backslash 4} = [1.37x10^6 /1.2x10^{-9}]^{1/4} = 5812.8$ K

مثال 4- متوسط القدرة المتولدة من الشمس يساوي تقريباً $3.9756x10^{26}$ وات. إذا كان متوسط طول الموجات للإشعاعات المنبعثة من الشمس هو 500 نانو متر. فكم عدد الفوتونات المنبعثة من الشمس في الثانية الواحدة.

الحل

$E_v = h\nu = hc/\lambda = (6.626x10^{-34})(3x10^8)/ 500x10^{-9} = 3.9756x10^{-19}$ جول

$N = P/ E_v = 3.9756x10^{26} / 3.9756x10^{-19} = 10^{45}$

5-1 عرض وشدة الخطوط الطيفية

إن امتصاص الطاقة من قِبل الجزيئات تسبب انتقال الجزئ من مستوى لآخر ، ونتيجة للانتقال نحصل على خط الطيف. ويتعين موقع الخط الطيفي بقياس طلاً من التردد أو الطول الموجي أو العدد الموجي. إضافة إلى ذلك هنالك خاصيتين مهمتين وهما عرض وشدة خطوط الطيفي.

1- عرض خطوط الطيف:

من الملاحظ أن الإمتصاصات أو الإنبعاثات الطيفية لا تكون بشكل بالغ الحد infinitely sharp lines ولكنها تقريباً تبدو بشكل حزم عريضة ، ويعزى السبب في ذلك إلى الفتحات الميكانيكية في أجهزة الطيف التي لا تكون ضيقة إلى أبعد الحدود ، وبذلك تسمح بمدى الترددات لتسقط على الكاشف بدلاً من تردد فردي مما يجعل الهيئة غير واضحة. وبالرغم من تطور الأجهزة وتحسن قوة الفصل إلا أن هناك عرضا طبيعياً أدنى لا يمكن لأي انتقال ذري أو جزيئي أن يتجاوزه مهما كانت قوة الفصل عالية. وينتج هذا العرض Spectral broadening من عدم إمكانية إيجاد مستويات الطاقة للأنظمة الذرية والجزيئية بدقة. وهناك عدة عوامل تشارك في هذه الخاصية.

- قاعدة اللادقة لهايزنبرج Heisenberg uncertainty principle:

إن مستويات الطاقة المكمّمة quantized ، حتى في الجزيئات المعزولة أو المستقرة ، ليست حادة جداً وذلك بفعل تطبيق القاعدة الأساسية للادقة لهايزنبرج ، والتي تنص على: أنه لو وُجد نظام في مستوى معين من مستويات الطاقة لزمن محدد مقداره □□ من الثواني فسيكون هناك لا دقة في طاقة النظام مقدارها □□ والعلاقة بين □□ و □□ تعطى بـ

□□x □□≈h≈10^{-34} (جول ثانية) (1-25)

ومن المعروف أن مستوى الطاقة المنخفض للنظام الذري يمكن أن يكون حاداً طالما أن النظام يبقى في ذلك المستوى لزمن لا نهاية له، لذلك فإن ∞□□ و □□. وبالنسبة للمستوى الإلكتروني المتهيج (المثار) فإن زمن العمر □□ هو بحدود 10^{-8} ثانية وقيمة □□ تساوي تقريباً 1□□ جول. وعندما يحصل الانتقال بين هذا المستوى وبين المستوى

□ □. =□ □. /h = h/2□ h□ □. □.¯1□ □ □ □.¯1□ □.

فمثلاً مستوى اللف للإلكترون المتهيج له زمن عمر مقداره 10^{-7} ثانية والذي يقود إلى قيمة للتردد (من المعادلة 2-5) مقدارها 10^{7} هيرتز للانتقال. ولو قارنا هذه القيمة بالتردد الحقيقي للانتقال وهو 10^{9} – 10^{8} هيرتز لظهر لنا في الحقيقة انتقالاً عريضاً ، وهنا يظهر بوضوح تأثير مبدأ اللادقة.

- عرض التصادم Collision Broadening:

إن الذرات والجزيئات في كل من الطور الغازي تكون في حركة مستمرة وتعاني من تصادمات عديدة فيما بينها ، فلو كان زمن التصادم بين أي جزيئين X و Y طويلا مقارنة بمتوسط الزمن بين التصادمات فإن طاقة الامتصاص أو الانبعاث لتلك الجزيئات ستُشَوش على الجزئ X بالمجالات الكهربائية والمغناطيسية على الجزئ Y. وهذا يؤدي على الأقل إلى تشوش perturbing طاقات الإلكترونات الخارجية. وهذا يعطي تفسيراً لعرض خطوط الطيف في منطقتي المرئي وفوق البنفسجية طالما أن هاتين المنطقتين تتعلقان بدراسة الانتقالات بين الإلكترونات الخارجية. كما أن الأطياف الاهتزازية والدورانية تكون عريضة كذلك بسبب تداخل التصادمات مع هذين النوعين من أنواع الحركة.

- ظاهرة دوبلر الحرارية Thermal Doppler effect :

إن حركة الجسيمات في الغازات تؤدي إلى ظهور تأثير دوبلر في ترددات الامتصاص والإنبعاث لها. وتعزى هذه الظاهرة إلى تغير سرعة الجزئ υ - التي تعتمد على درجة حرارة الغاز وكذلك مكوناته بالعلاقة $\upsilon = (2kT/m)^{1/2}$ - نسبة إلى سرعة القياس بالجهاز ، $\upsilon+$ و $\upsilon-$ مما يؤدي إلى تغير تردد الإشعاع الملاحظ للجزئ بإتجاهي القيمة الأعلى والأقل. ويعتمد هذا التغير للتردد على اتجاه حركة الجزئ. وبالنسبة لمجموعة من الجزيئات التي لها سرعات مختلفة نسبة إلى سرعة القياس بالجهاز فإن الخط الناتج سيكون عريضاً. ويكون هذا التأثير كبيراً في الجزيئات الخفيفة مثل H_2 عند 300 درجة مطلقة.

2-شدة خطوط الطيف :

إن أهم العوامل تحدد شدة خطوط الطيف هي : احتمالية الانتقال Transition probability ، وعدد الذرات والجزيئات في المستوى الذي يحصل منه الانتقال أو ما يسمى بتعداد الجزيئات population ، وكمية المادة التي سيقاس الطيف لها.
وفي الوسط الغازي تحدث عملية الإثارة للذرات excitation وكذلك العملية الأخرى المعاكسة لها وهي الرجوع لحالة الاستقرار de-excitation ، نتيجة لعمليات التصادم والإشعاع التي تحدث بين الغازات. وتلك العمليتان تعتمدان على درجة حرارة الوسط. ومتوسط طاقة حركة الغازات تعطى بـ $<m\upsilon^2/2>=3kT/2$ ، حيث m كتلة الغاز و T درجة الحرارة المطلقة و k ثابت بولتزمان ويساوي $1.38\text{x}10^{-23}$J/K و υ السرعة. مع زيادة درجة الحرارة تزداد بسرعة عدد الفوتونات ذات طاقة معينة ، ولذلك خطوط الامتصاص التي تنشأ من عملية الاثارة لمستويات الطاقة تصبح أكثر شدة في الغاز الساخن منها في الغاز البارد. في حالة الاتزان الحراري فإن الذرات التي في حالة إيثاره تكون متوازنة مع الذرات التي ترجع إلى حالة الاستقرار وبالتالي فإن الكثافة العددية للذرات في مستوى الطاقة B وعلاقتها بالكثافة العددية بالذرات في مستوى الطاقة A ، حيث B>A ، لكل عنصر تعطى بعلاقة بولتزمان التالية

$$N_B / N_A = (g_A/g_B)\ \exp\{(E_A-E_B)/kT\} \qquad (1\text{-}27)$$

حيث N هي الكثافة العددية في مستوى الطاقة و g هي دالة الوزن الإحصائي و E طاقة مستوى الطاقة.

وعندما تزيد درجة الحرارة بدرجة كافية أكبر من درجة حرارة التصادم أو الإشعاع يحدث تأين للذرات. وعموماً يتكون الوسط الغازي الساخن من ذرات متعادلة و متأينة وإلكترونات حرة. ومع زيادة الكثافة العددية للإلكترونات N_e يؤدي هذا إلى احتمالية زيادة اتحاد الأيونات مع الإلكترونات للتحول إلى ذرات متعادلة. هاتان العمليتان التأين والاتحاد recombination ($X^+ + e \leftrightarrow X$) تصلا إلى حالة الاتزان عندما يتحقق شرط حالة الاستقرار steady state ، وهو أن معدل معامل التأين يساوي معدل معامل الاتحاد. وتحسب عملية الاتزان هذه باستخدام معادلة سها Saha

$$N_i/N_0 = \{ A(kT)^{3/2}/N_e\}\ \exp(-\chi_0/kT) \qquad (1\text{-}28)$$

حيث N_i هي الكثافة العددية للأيونات وN_0 هي الكثافة العددية للذرات المتعادلة في مستوى الاستقرار و A ثابت و χ_0 جهد التأين.
ويمكن تعميم هذه المعادلة لتعطي نسبة N_{i+1}/Ni لأي درجة تأين i+1 و الدرجة التي تقل عنه i

$$N_{i+1}/Ni = \{ A(kT)^{3/2}/N_e \} \exp(-\chi_i/kT) \qquad (1-29)$$

حيث χ_i جهد التأين للدرجة i .

1-6 معادلة الانتقال

واحدة من أهم المشكلات في الفيزياء الفلكية هي كيفية حساب كثافة الإشعاع بعد عبوره خلال سحابة من الغازات أو الغلاف الجوي للكواكب والنجوم . المعادلة التفاضلية التي تصف تلك العملية تسمى معادلة الانتقال وهي :

$$I_v = I_v(0) \exp[-(\tau_2 - \tau_1)/\mu] + \mu^{-1} \int_{\tau 1}^{\tau 2} s_v \exp[-(\tau_2 - \tau_1)/\mu]\, d\tau \qquad (1\text{-}30)$$

حيث I_v كثافة الإشعاع بعد مروره خلال مسافة قدرها dl و $I_v(0)$ كثافة الإشعاع الابتدائية و v التردد خلال المسار. و العمق الضوئي للإشعاع هو $\tau = \int x_v dl$ ، حيث x_v معامل انطفاء الضوء extinction خلال المسار. و $s_v=\eta_v/x_v$ هي دالة المصدر و η_v معامل الانبعاث emission (أي كمية الطاقة المضافة إلى مجال الإشعاع). في حالة الاتزان الحراري الهيدروديناميكي s_v تعطى بتوزيع بلانك.

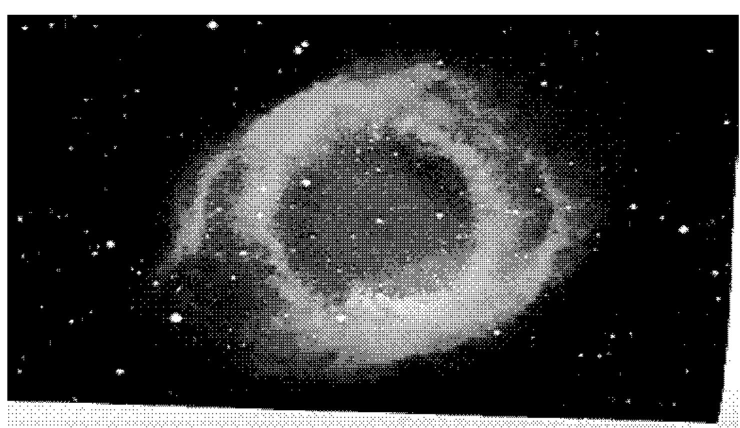
وحل المعادلة (1-30) في حالة انتقال الإشعاع خلال الغلاف النجمي ، حيث العمق الضوئي يصل إلى ما لا نهاية ، نجد أن $I_v= s_v$ (هذه العلاقة تسمى علاقة اينجتون-باربير). أما في حالة السدم الغازية نجد أن $I_v= s_v(1-e^{-\tau})$. في هذه الحالة τ هي العمق الضوئي الكلي ، وعندا يكون العمق الضوئي كبير جداً – أي $\tau>>1$ نحد أن $I_v= s_v$. أما في حالة العق الضوئي الضعيف تكون $I_v= s_v\tau$.

الفصل الثاني

ميلاد النجوم (مرحلة الأجنة)

2-1 مادة ما بين النجوم

إن الفضاء يمتد امتدادا شاسعا ، والكواكب والنجوم والمجرات إنما هي جزء ضئيل من الحجم الكلي للكون. والمسافات ما بين هذه الأجرام يشار إليها بمسافات ، ما بين الكواكب ، و، ما بين النجوم ، و ، ما بين المجرات ،علي الترتيب . ولكن أيا منها ليس خاويا. فمنذ بداية القرن العشرين تأكد الفلكيون أن الفراغ الضخم بين النجوم داخل المجرة يمتلئ بمادة غازية تسمى مادة ما بين النجوم. ومادة ما بين النجوم تم اكتشافها في عام 1904 عندما لاحظ العالم الهولندي هارتمان الذي كان يدرس طيف أحد المزدوجات النجمية الطيفية في منطقة الجبار ذو الخطوط الطيفية العريضة وجود نوع من الخطوط الطيفية الضعيفة لكنها في نفس الوقت حادة الملامح ، وبعد تحليل هذا الطيف وجد أنه لذرة الكالسيوم المتأينة ولذرة الصوديوم. وفى عام 1922 لاحظ هيجر Heger وجود خطوط طيف لعناصر كيميائية معقدة. وقد تم اكتشاف أول ثلاث مركبات كيميائية في مادة ما بين النجوم وهم الميثيلدين Methylidyne (CH) و أيون الميثيلدين Methylidyne ion (CH^+) و السيانوجين Cyanogen (CN) بعد ذلك بين عامي 1937-1941. ففي دراسة السحابة البين نجمية الموجودة في كوكبة حامل الأفعى القريبة من النجم زيتا أوفيوشي ذي الحرارة العالية عام 1941 تم رصد خط طيف امتصاص عند طول موجي قدره 3875 أنجستروم ، وهذا يشير إلي أنه يوجد في هذه السحابة جزيئات السيانوجين المستقر.وهذا يعني أن جزيئات السيانوجين CN في الفضاء تكون أكثر استقرارا من الحالة العادية علي سطح الأرض ، لأنه علي سطح الأرض سرعان ما يكون روابط كيميائية أكثر استقرارا مثل حمض سيانور الماء HCN . وبإعادة دراسة هذا الخط وجد أنه مشطور إلي خطوط ، وأنة يتألف من ثلاث مركبات أطوال موجاتها 3874.608 و 3875.763و 3873.998 أنجستروم. وتفسير هذا يعني أن أول واحد بين أطوال موجات الامتصاص هذه يرجع إلي انتقال السيانوجين من أقل مستوى للطاقة (الحالة الأساسية) إلي الحالة الاهتزازية. وهذا الانتقال لابد أن يتم حتى ولو كان السيانوجين في درجة حرارة مساوية للصفر المطلق. بينما الخطان الآخران لا يمكن أن يحدثا إلا بانتقالات يمر فيها السيانوجين من حالة دوران طاقتها أعلي مباشرة من طاقة الحالة الأساسية إلي مختلف حالات الاهتزاز، وهذا يعني أن جزيئات السيانوجين في حالة دوران. وباستخدام فرق الطاقة المعروف بين الحالة الأساسية وبين حالة الدوران استنتج أن هذا الغاز يعاني اضطرابا من نوع ما درجة حرارته الفعلية هي 2.3 درجة مطلقة. وتعتبر هذه النتيجة تبشيرا



سديم حلزوني يسمى NGC7293 داخل مجرتنا على بعد 125 بارسك من الشمس. اللون الأخضر ناشئ من ذرات الأكسجين المتأينة ، بينما اللون الأحمر ناشئ من عناصر الهيدروجين والنيتروجين

ثم عام 1951 بواسطة المناظير الراديويه تم رصد طيف الهيدروجين المتعادل Neutral Hydrogen - المكون الرئيسي للكون - ، برغم سبق توقع وجوده نظريا قبل ذلك بكثير. فقد بدا منطقيا ضرورة وجود كميات كبيرة من الهيدروجين في الفضاء ، وذلك لأن الهيدروجين هو أكثر العناصر شيوعا في الكون وأحد المكونات الأساسية للنجوم. إلا أنه لم تكن هناك طريقة لاكتشافه حتى ظهور المناظير الراديويه. والهيدروجين المتعادل غاز بارد غير مرئي ، وليس ساخنا نظرا لعدم وجوده بالقرب المباشر من نجم ساخن وبالتالي فهو غير متأين. وقبل اكتشاف الهيدروجين كانت الحسابات قد أوضحت إمكانية إشعاعه عند طول موجي قدره 21 سم بذبذبة مقدارها 1420 ميجا سيكل.و ينشأ هذا الطول الموجي من الهيدروجين المتعادل تحت ظروف خاصة جدا.

ولتوضيح هذه الظروف ، نذكر أنه من المعروف أن ذرة الهيدروجين المتعادلة تتكون من بروتون واحد يدور حوله إلكترون واحد. والإلكترون الذي يدور علي مسافة كبيرة من النواة له طاقة أكبر عن الذي يدور قريبا منها. وعندما ينتقل الإلكترون من مدار اكبر في الطاقة إلي آخر أصغر في الطاقة ينبعث فرق الطاقة علي هيئة فوتون ضوئي. وأقل مدار ممكن يسمى بحالة أو مستوى الخمود Ground State، وهذا المستوى يتكون من مدارين مختلفين في طاقتهما بقدر بسيط أعلاهما طاقة يوجد في وضع أعلي بعض الشيء . ويدور البروتون الذي تتكون منه النواة حول محوره ويصاحب هذا الدوران مجال مغناطيسي صغير عمودي علي مستوي مدار الإلكترون. كما يدور الإلكترون أيضا حول محوره مصطحبا بمجال مغناطيسي خاص. وهذا المجال عمودي أيضا علي مستوي مدار الإلكترون. أما كون مجالا البروتون والإلكترون لهما نفس الاتجاه أم أنهما متضادين تماما ، فيأتي من اتجاه دوران الإلكترون حول البروتون مع عقارب الساعة أو ضدها. كما أن الاتجاه الذي يدور فيه الإلكترون يتحدد بدوره بمعلومية مستوي الخمود الذي يحتله الإلكترون. فإذا كان الإلكترون موجود في مستوي الطاقة الأعلى قليلا ، فأنه يدور في أحد الاتجاهين، وإذا كان في المستوي الأقل قليلا يدور في الاتجاه الآخر.

ومن قوانين الكم تتم الانتقالات من تلقاء نفسها ، فيتحرك فيها الإلكترون في مستوي الخمود من مدار أعلي طاقة إلي آخر أقل طاقة . عندما يحدث ذلك يغير الإلكترون من اتجاه دورانه وينطلق فوتون ضوئي منخفض الطاقة ، يناظر طول موجي 21 سم. وهذا الانتقال يحدث في المتوسط في ذرة بذاتها مرة كل إحدى عشر مليون سنه. وهذا لا يعني أن يتم ذلك كل إحدى عشر مليون سنه ، وإنما ذلك في المتوسط فقط ، فقد لا ينتقل الإلكترون إطلاقا في ذرة ما بينما يتم الانتقال في ذرة أخري عدة مرات في إحدى عشر مليون سنه. ومهما كان فلو أن عدد الذرات قليل لتحتم علينا الانتظار وقتا طويلا لدرجة غير معقولة حتى نلتقط إشعاع الطول الموجي 21 سم. ولكن وجود تريليونات و تريليونات الذرات يجعل قدوم الإشعاع بدون انتظار.

ونظرا لأن سحب الغاز متحركة فإن ظاهرة دوبلر تلعب دورا في إشعاع الطول الموجي 21 سم ، بحيث يأتينا علي شكل شريط يضم الموجات القريبة من هذا الطول. فإذا كان الهيدروجين مبتعدا عنا فان طول الموجة يبدو أطول قليلا ، أما إذا كان مقتربا فإنها

وظاهرة دوبلر هي تغيير ذبذبة الموجات الإشعاعية والناتج عن الحركة أو السرعة النسبية بين المشاهد ومنبع الإشعاع. فإذا ما كان المنبع مقتربا شاهد الراصد ذبذبات أعلى عما يتم إشعاعه بالفعل. الأمر الذي يؤدي إلى إزاحة الضوء في اتجاه الناحية الزرقاء من الطيف. أما إذا كان المصدر مبتعدا عن المشاهد فإن الأخير يستقبل موجات منخفضة في ذبذبتها عما يتم إشعاعه بالفعل ، الأمر الذي يعني إزاحة حمراء.

ويمكن رؤية سحب الغاز المختلطة بالغبار بصريا ، في حين لم تكن هناك طريقة للاستدلال علي السحب الخالية من الغبار ، أو التي تحتوي علي كمية قليلة منه إلا بعد إدخال المناظير الراديويه واكتشاف الطول الموجي 21 سم. ويرجع السبب في ذلك إلي أن سحب الغبار والغاز لا تشتت ولا تمتص الطول الموجي 21 سم أو الذبذبات الأطول منة بنفس القدر الذي تؤثر به علي الضوء المرئي.

ومنذ عام 1969 ميلادية تم اكتشاف الجزيئات العضوية في سحب مادة ما بين النجوم.ففي نهاية عام 1968 ميلادية تمكنت مجموعة أمريكية بقيادة س.هـ. تاونسي من اكتشاف خطوط طيفية راديويه عند الأطوال الموجية 1.25سم و 1.35سم لكل من الأمونيا Ammonia (NH_3) والماء Water (H_2O). وفي عام 1969 ميلادية تمكنت مجموعة أخري من اكتشاف خط الطيف عند الطول الموجي 6.2 سم الدال علي وجود الفورمالدهيد Formaldehyde (H_2CO). ثم تلي بعد ذلك اكتشاف مركبات جديدة مثل الكحول الميثيلي و حامض النمليك و الاسيتيلين الميثلي والفورمالدميد و الاسيتالدهيد والفورمالديمين والميثيل الأميني والديمثيل الاثيرى وسيانيد الفنيل والكحول الايثيلي وجزيئات أخري غيرها.

وبعد تطور المناظير الراديوية في عام 1970 ميلادية إلي الآن تم كشف طيف أكثر من 147 عنصر ومركب كيميائي حتى الآن في السحب البين نجمية والمادة المحيطة بالنجوم Circumstellar

ولقد أصبحت دراسة هذه المادة من الناحية الفيزيائية والكيميائية أحد دعائم علم الفيزياء والكيمياء الفلكية الحديثة.وفي بادئ الأمر تركزت الدراسة علي خطوط الامتصاص القادمة من سحب ما بين النجوم الكثيفة ، التي لا تحجب كليّاً الضوء القادم من النجوم الواقعة خلف تلك السحب ، وتلك الخطوط تنتج عن الانتقال الإلكتروني Electronic Transitions داخل

وفي هذه السحب تتفاعل ذرات الهيدروجين والأكسجين والكربون والنيتروجين والكبريت لتكون جزيئات الماء وأول أكسيد الكربون والأمونيا وكبرتييد الهيدروجين وغيرها من الجزيئات العضوية .بل توجد أيضا جزيئات معقدة مثل كحول الإثيل .

وفي مادة ما بين النجوم ، مناطق ذات كثافة بسيطة يمكن أن تظهر في صورة مضيئة أو غير مضيئة، ويعتمد ذلك على النوع الطيفي لما يجاورها من نجوم. وتتكون هذه المادة من جزء غازي Gas phase وآخر ترابي (غبار) Cosmic Dust . والجزء الغازي يتكون من ذرات منفصلة وجزيئات وأيونات وإلكترونات طليقة. والجزء الأكبر من الغاز عبارة عن غاز هيدروجين الذي يوجد مختلطا مع الهليوم بنسبة 1/5 إلى 1/10 ، أما العناصر الأخرى فهي أقل ندرة من ذلك بكثير. وتبلغ كثافة غاز ما بين النجوم حوالي ذرة هيدروجين لكل سم^3 . والغاز متجمع أساسا في سحب ، ذات خواص مختلفة ، يبلغ قطر كل منها من 5 إلى 10 بارسك Parsec (البارسك يساوي 2.6 سنة ضوئية) وكثافتها حوالي عشر جسيمات لكل سم^3 إلى 10^7 جسيم لكل سم^3 أو يزيد. وهناك السحب الساطعة وتسمي أحيانا السدم الساطعة Nebula Bright. ويعد سديم الجوزاء Gemini Nebula مثالا لهذه السحب.

ومنها من هو متجمع في سحب تكون جد معتمة بحيث تمنع مرور الضوء الآتي من النجوم البعيدة. وتحتوي هذه السحب على نوع الغازات نفسها الموجودة في السحب الساطعة.

ويتم التميز بين سحب ما بين النجوم تبعا لدرجة تأين الهيدروجين إلى منطقتين في الفضاء.إذ يصنع كل نجم حوله منطقة تسمى H_{II} يكون الهيدروجين فيها تام التأين. وينشأ تأين الهيدروجين من امتصاص الضوء فوق البنفسجي **U.V** القادم من النجوم ذات الحرارة الشديدة. تزيد مناطق H_{II} في الكبر كلما زادت سخونة النجم. وعلى مسافات بعيدة من النجوم يوجد الهيدروجين في حالة متعادلة وتكون درجة التأين صغيرة جدا حيث يقل الضوء فوق البنفسجي القادم من النجوم. وهذه المناطق تسمى منطقة H_I . ومن الممكن أن يتأين جزء

وتمثل درجة حرارة غاز ما بين النجوم تعادلا بين الطاقة الداخلة إلي الغاز والخارجة منه . ويأتي أكبر كسب للطاقة من تأين الهيدروجين حيث يقوم الإلكترون المنطلق بتسخين الوسط الذي يتحرك فيه ويأتي هذا التأين بواسطة الأشعة الكونية Cosmic Rays والأشعة الضوئية Photons القادمة من النجوم ، أو من تصادم الغازات بعضها ببعض . مقابل هذا التسخين توجد عمليات تبريد نتيجة إشعاع الطاقة إلي خارج مادة ما بين النجوم.

وفي حالة تعادل التبريد مع التسخين تصل حرارة مناطق H_{II} إلي ما بين 600 إلي 1000 درجة مطلقة . أما في مناطق H_I فلا يوجد تأين وعليه تقل فاعلية أكبر عامل تسخين وتصبح درجة الحرارة أقل بكثير من مناطق H_{II} . وفي بعض الأحيان يحدث تصادم بين السحب بعضها البعض وبالتالي ترتفع درجة حرارة مناطق H_I إلي بضع آلاف من الدرجات لبعض الوقت . نتيجة ما يتبع ذلك من التبريد تفقد السحابة بعض طاقتها لذلك تنخفض درجة حرارة السحابة بعد التصادم تدريجيا إلي ما بين 20 إلي 50 درجة مطلقة .

أما المكون الثاني لمادة ما بين النجوم فهو الغبار الذي ظل يراوغ العلماء بعد اكتشافهم الغاز حتى الثلاثينيات من القرن العشرين ، حين لاحظ بعض العلماء أن بعض النجوم تظهر حمراء Stars Reddening بأكثر مما هي عليه بعد ما علموه من أن لون أي نجم دالة في درجة حرارة سطحه. والغبار هو الجسيمات الصغيرة والصلبة المنتشرة في المادة المبعثرة فيما بين النجوم. والغبار في الغالب مركز في السحب وتبلغ كثافته المتوسطة 10^{-12} جسيم /سم^3 وهذه السحب تسمي السدم العاكسة Reflection Nebula. وحبات الغبار ما هي إلا حبات من الجرافيت أو السيليكون يحاط سطحها بجزيئات الماء والميثان والأمونيا وبعض الأكاسيد وبعض الهيدرات عندما تكون درجة الحرارة منخفضة.

ويستدل مباشرة على التراب الكوني من خلال : أولا السدم السوداء Dark Nebula التي تبدو واضحة في طريق التبانة تمتد عبر عشرات البارسك ممتصة ضوء النجوم التي خلفها ، ولذا تبدو كسحابة سوداء. ثانيا الإعتام العام General Obscuration الذي يمنع وصول ضوء المجرات التي في اتجاه طريق التبانة وكذلك يزيد من القدر Magnitude الظاهري لنجوم الحشود المجرية المفتوحة .ثالثا احمرار ضوء النجوم الذي يحدث من خلال الانعكاس عندما يمر الضوء خلال السحابة الترابية فإنه يضعف. وبالتالي فإن مركبات الضوء السبعة تقل كل

2-2 العوامل الفيزيائية في مادة ما بين النجوم

أولاً عملية التبريد

تتم عملية تبريد cool سحب مادة ما بين النجوم بإشعاع الطاقة وليس بأي طريقة أخرى. وعملية إشعاع الطاقة عادة تبدأ أولا بإثارة excitation الذرات والأيونات والجزيئات ، من مستوى طاقة الخمود إلى مستوى طاقة أعلى ، عن طريق التصادم بجسيم آخر. في هذه العملية الجسيم المثار يكتسب طاقته من طاقة حركة الجسيم المصتدم به

$A + B \rightarrow A + B^*.$

الجسيم المثار بعد فترة زمنية يشع الطاقة التي اكتسبها على هيئة فوتونات إلى الفضاء المحيط بسحب مادة ما بين النجوم

$B^* \rightarrow B + \text{photon}.$

وهذا يعني أن غاز مادة ما بين النجوم فقد طاقة حركته مما يؤدي إلى برودته.

ففي السحب ذات درجات الحرارة التي تزيد أو تساوي مائة درجة مطلقة فإن أيون الكربون وأيون السيليكون والأكسجين وجزئ الهيدروجين من أهم الجزيئات التي تقوم بعملية تبريد سحب مادة ما بين النجوم.

فعند تصادم أيون الكربون وهو في مستوى $C^+(\,^2P_{1/2}\,)$ مع الهيدروجين وجزئ الهيدروجين والإلكترونات ، فإن أيون الكربون يثار إلى المستوى الأعلى $C^+(^2P_{3/2})$

$C^+(\,^2P_{1/2}\,) + H \rightarrow C^+(\,^2P_{3/2}\,) + H$

$C^+(\,^2P_{1/2}\,) + H_2 \rightarrow C^+(\,^2P_{3/2}\,) + H+2$

$C^+(\,^2P_{1/2}\,) + e \rightarrow C^+(\,^2P_{3/2}\,) + e.$

والفرق في الطاقة بين المستويين يساوى $1.4X10^{-21}$ جول ، والذي يكافئ 92 درجة مطلقة.

وبعد فترة زمنية يعود أيون الكربون إلى وضعة الأصلي ويشع كمية الطاقة التي اكتسبها.

وعندما يتصادم أيون السيليكون $S^+(\,^2P_{1/2}\,)$ مع الإلكترونات ، فإن أيون السيليكون يثار إلى $S^+(^2P_{3/2})$

$Si^+(\,^2P_{1/2}\,) + e \rightarrow Si^+(\,^2P_{3/2}\,) + e.$

والفرق في الطاقة بين المستوى التهيج ومستوى الخمود يشع بعد زمن قصير ، وتبلغ مقدار تلك الطاقة 413 درجة مطلقة.

وأخيرا عندما يتصادم الأكسجين مع الهيدروجين والإلكترونات

$O^+(\,^3P_2\,) + e \rightarrow O^+(\,^3P_2\,) + e$

$O^+(^3P_2) + H \rightarrow O^+(^3P_2) + H.$

فإن كمية الطاقة التي تمتص ثم تشع بعد ذلك قدرها 326 درجة مطلقة للتصادم مع الإلكترونات ، و 228 درجة مطلقة للتصادم مع الهيدروجين.

وفي السحب الكثيفة التي تبلغ درجة حرارتها عشر درجات مطلقة فإن أول أكسيد الكربون هو العامل الأساسي في عملية التبريد. حيث يبلغ الفرق في الطاقة بين مستوى الدوران (rotational level) J=0 و J=1 مايكافئ 5.5 درجة مطلقة.

ثانياً عملية التسخين

إن سحب غاز مادة ما بين النجوم بعيدة جدا عن حالة التعادل الحراري وتفقد فيه لذلك درجة الحرارة معناها. إلا أنه يمكن تعريف درجة حرارة حركة يمكن حسابها من السرعة المتوسطة للجسيمات ، وتمثل تعادلا بين الطاقة الداخلة إلى الغاز (أي التسخين) والخارجة منه (أي التبريد). وعوامل تسخين الغاز كثيرة ، منها تأين الجسيمات بواسطة :

1- الإشعاع النجمي star light:

$A + photon \rightarrow A^+ + e$

في كل عملية تأين يأخذ الإلكترون المنطلق طاقة حركة تزداد في الكبر كلما إزدادت طاقة الكم الممتصة ، أي زيادة شدة الإشعاع النجمي. والإلكترون المنطلق من هذه العملية يختلط بالغاز ، ويتصادم معه في تصادمات مرنة elastic وغير مرنة inelastic ، وبالتالي يصبح هذا الإلكترون من أحد عناصر تسخين الغاز. ففي مناطق H_{II} تكون طاقة الفوتونات أكبر من 13.6 إلكترون فولت ، وهذا يؤدي إلى تأين الهيدروجين

$H + photon \rightarrow H^+ + e.$

أما في مناطق H_I تكون طاقة الفوتونات أقل من 13.6 إلكترون فولت ، وهذا يؤدي إلى تأين الكربون الذي يمثل العنصر الأساسي في عملية التأين.

$C + photon \rightarrow C^+ + e.$

والإلكترون الناتج من عملية تأين الكربون تبلغ طاقة حركته 2.3 إلكترون فولت.

2- الأشعة الكونية cosmic ray:

$A + CR \rightarrow A^+ + e$

عندما تبلغ طاقة الأشعة الكونية مليونـان إلكترون فولت (2Mev) ، فإن الإلكترون النـاتج من عملية التأين تبلغ طاقته 30 إلكترون فولت. وتبلغ احتمالية تصرف الإلكترونـات الناتجـة من هذه العملية ثلاثة احتمالات ، أولها أن جزءاً من هذه الإلكترونات يقوم بتسخين الغاز مباشرة عن طريق التصادم المرن. أما ثاني احتمال فإن الإلكترونات تتصادم مع الهيدروجين مما يؤدي إلى تأينه

$H + e \rightarrow H^{+} + e + e.$

وفي هذه الحالة يزيد عدد الإلكترونات في سحب مادة ما بين النجوم ، و تبلغ طاقة الإلكترون الثاني 3.4 إلكترون فولت. أما ثالث احتمال يحدث عندما تقل طاقة الإلكترونات عن 13.6 إلكترون فولت. في هذه الحالة يثار excite الهيدروجين نتيجة لتصادم الإلكترونات مع الهيدروجين.

$H(1s) + e \rightarrow H(2p) + e \rightarrow e + H(1s) + \text{photon}$

ثم بعد ذلك تعود ذرة الهيدروجين إلى حالة الخمود بإشعاع طاقة التهيج excitation على شكل فوتون ، مما يؤدي إلى برودة السحابة. وهذه العملية تتوقف عندما تقل طاقة الإلكترونات عن 10.2 إلكترون فولت.

3- أشعة اكس X-ray

التأين بواسطة أشعة أكس يشابه التأين بواسطة الأشعة الكونية ، فيما عدا أن

$A + \text{X-ray} \rightarrow A^{+} + e.$

فالعنصر المؤثر هنا هو الهليوم (الذي يمثل 10% من عدد ذرات الهيدروجين) بدلا من الهيدروجين ، لأن مساحة مقطع امتصاص cross section for absorption الهليوم لأشعة أكس أكبر من مساحة مقطع امتصاص الهيدروجين لأشعة أكس. ولقد وجدا أن أشعة أكس ذات طاقة قدرها 50 إلكترون فولت عندما تصطدم مع الهليوم تنتج إلكترون ذو طاقة هدرها 25 إلكترون فولت.

ويتبع تأين جزئ الهيدروجين (طاقة تأين جزئ الهيدروجين تساوي 15.4 إلكترون فولت) بواسطة الأشعة الكونية أو أشعة أكس تفاعلات كيميائية طاردة للحرارة ، مثل

$H_2^{+} + H_2 \rightarrow H_3^{+} + H$

$H_3^{+} + e \rightarrow 3H$ أو $H_2 + H.$

فكمية الطاقة الناتجة من التفاعلات السابقة التي تضاف إلى سحب مادة ما بين النجوم تقدر بحوالي 11 إلكترون فولت. وجزء من هذه الطاقة يكتسبه الجزيء نفسه والجزء الآخر يدخل في عملية التسخين.
وبالمثل باقي المركبات الكيميائية ذات التفاعلات الطاردة للحرارة تساعد في تسخين سحب مادة ما بين النجوم . والعكس صحيح فالتفاعلات الماصة للحرارة وعملية الإثارة تساعد في عملية تبريد سحب مادة ما بين النجوم.

ثالثاً حساب درجة الحرارة

تحسب درجة حرارة الغاز الكلية عن طريق حساب درجة حرارة إثارة excitation temperature غاز أول أكسيد الكربون CO. غاز أول أكسيد الكربون يحتوي على عزم قطبي dipole moment صغير ، يبلغ تقريبا 0.1 Debye ، وهذا يؤدي إلى إثارة excited بسهولة.
ففي حالة شدة intensity قليل الكثافة الضوئية optically thin من مستوي الدوران J=1-0 و J=2-1 يمكن حساب درجة حرارة إثارة CO باستخدام العلاقة التالية :

$$R_{21}= 4 \exp(-11/ T_{ex})$$

حيث R هي النسبة بين شدة خطي الطيف من J=1-0 و J=2-1 ونحصل عليها من الأرصاد الفلكية للطيف. T_{ex} درجة حرارة إثارة CO.
وفي حالة شدة انبعاث ضوئي كثيف optically thick من مستوي الدوران J=1-0 و J=2-1 يمكن حساب درجة حرارة إثارة CO باستخدام العلاقة التالية :

$$R_{21}= \{ \exp(5.5/ T_{ex}) - 1\} / \exp(11/ T_{ex}).$$

3-2 مواقع تكوين النجوم

لقد هيأت أرصاد النجوم وحسابات النماذج النجمية للفلكيين مفاهيم حول ميلاد وتطور النجوم. حيث تولد النجوم في السُدم أو السحب المظلمة للوسط البين نجمي، المكون وبوفرة من غاز وغبار في مجرتنا. عادة ولادة النجوم تكون في مواقع محددة فهي تقع داخل السدم الغازية المضيئة والتي إحداها ذات عرض 26 سنة ضوئية حيث إن مجموعتنا الشمسية ذات عرض 11 ساعة ضوئية في سديم الصياد، أيضاً غالبية النجوم تولد معاً كأسرة نجمية واحدة مثل حشد الثريا. وأهم مواقع تكوين النجوم هي :

1- سديم الجبار Orion Nebula

لقد تم اكتشاف هذه الكوكبة من النجوم منذ أكثر من 4000 سنة ق.م، و التي كانت إلهام للشعراء والأدباء في الأدب الإغريقي القديم حيث منذ أكثر من 2000 سنة ق.م يقول الشاعر هسيور عندما يظهر أوريون لأول مرة لا تجعل خدمك يغسلون الأذن المقدسة. يقصد أن السديم يتواري خلف الشمس في الربيع ويظهر في شهر يوليو. وأيضاً هناك أساطير يونانية أخرى أن هناك إلهة الصيد ارتيمس أحبت لدى اليونان صياداً يدعى أوريون (النجار) وتريد أن تتزوجه فأعمى ذلك شقيقها التوءم أبولو فبعث إليه بعقرب فلدغته ولقي حتفه، وتخليداً لذلك أطلق اسمها على السديم بسديم أوريون.

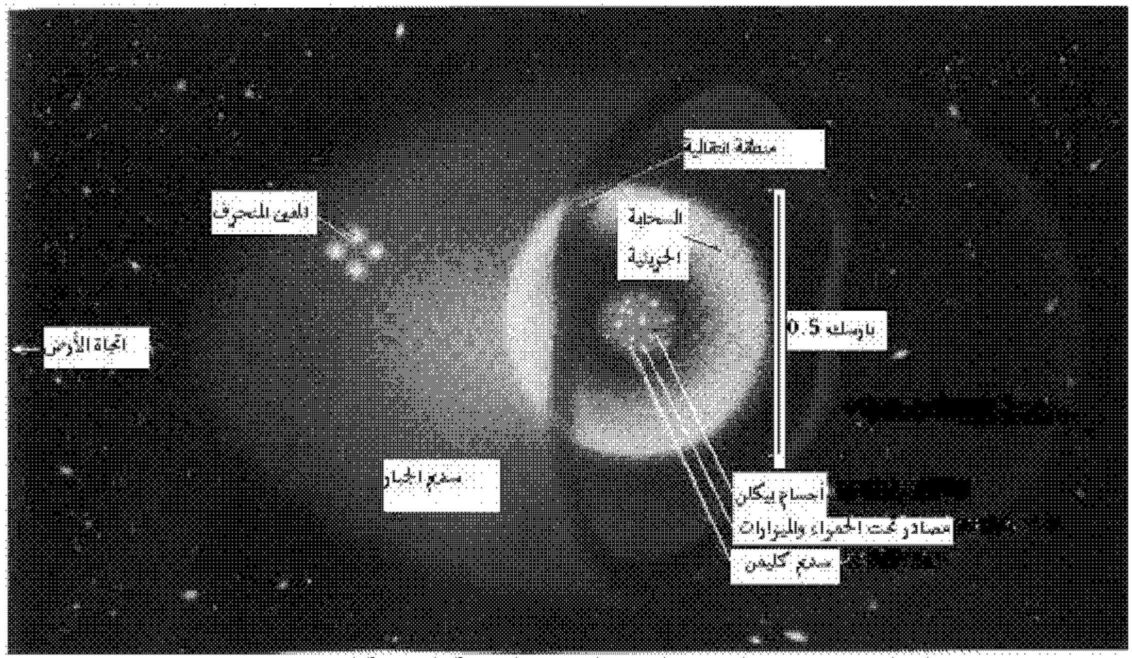
السحابة الجزيئية لأوريون The Orion Molecular Cloud:

هذا السديم عبارة عن بقعة ساخنة من الغازات المتوهجة والتي تتكون من الهيدروجين بالإضافة إلى الهليوم والنيتروجين والأوكسجين لتتحد وتكون سحابة تسمى بالسحابة الجزيئية لأوريون.فمن استكشاف هذه السحابة نتمكن من فهم الآلية التي تكونت عليها المجموعة الشمسية.

إذ يقع هذا السديم في كوكبة الجبار(الصياد) على بعد 1500 سنة ضوئية عنا، وتقع أسفل النجوم الثلاثة (حزام الجبار) التي تبدو للعين كغيمة مخضرة باهتة عند المطلع المستقيم $5^h\ 35.4^m$ والميل $-5^o\ 27'$ وتعرف بـ NGC 1976، وأيضاً من الفهرس لمسيه الفرنسي M42.

تتكون غالبية السحابة الجزيئية من النجوم ذات النوع O, B الحارة التي تصدر الإشعاع فوق البنفسجي والرياح النجمية القوية. ومعظم نجومها يتراوح عمرها في السديم بين 300 ألف إلى مليون سنة، بينما يصل عمر الشمس إلى 4.5 مليون سنة. وحيث أن هذه السحابة الجزيئية تحتوي على 500 مرة من الكتلة الشمسية من المادة التي تخفيها في عمق المادة السديمية. وهناك توجد الأربعة نجوم جديدة تسمى بالمعين المنحرف (Trapezium) وهي النجوم الأساسية لتأين هذه المنطقة التي جعلتها كأنها مساحة مقعرة والطاقة الموجودة فيها؛ وعمر هذه النجوم حوالي 10^5 سنة، أكبرها نجم(ثيتا-أ-سي) الذي يصل حجمه إلى 20 مرة من حجم الشمس وإضاءته المنبعثة منه 100 ألف مرة من إضاءة الشمس. وهذا السديم هو الجزء البارز منه والواقع فيه المنطقة المظلمة المواجه لنا تسمى منطقة HII (الهيدروجين المؤوين) الذي يعطي شكل البثرة المنتشرة القريب من السحابة الجزيئية ويبين ذلك الشكل (1-2)

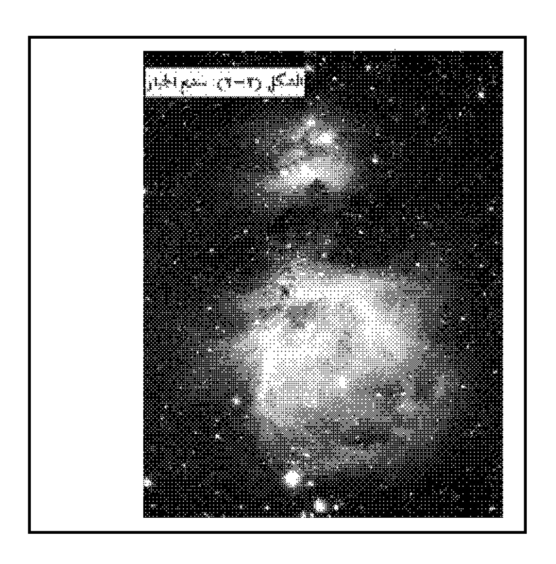
هذه السديمية المركبة من الجزيئات هي دار حضانة للنجوم. ومن خلال التلسكوب الفضائي هابل نرى فيها اللون الأخضر للضوء من الهيدروجين المتعادل وأما اللون الأحمر فيكون للنيتروجين المتأين لمرة واحدة واللون الأزرق عبارة عن الأوكسجين المتأين لمرة واحدة. هذه السحابة الجزيئية الرئيسية هي بمثابة 100 ألف مرة أكبر ضخامة من الشمس وكثافتها بمعدل 1000 جسيم في كل سنتيمتر مكعب (بالنسبة للحرف من السحابة؛ الحافة المظلمة باتجاهنا) ويزداد هذا التكثف كل 10^6 جسيم/سم^3 في اتجاه مركزها. ولذلك اهتم علماء الفلك في البحث عن النجوم الساخنة صغيرة السن في هذا السديم. ومن أمثال هؤلاء العلماء هو العالم الفلكي رو برت أوديل حيث قام بالتقاط صورة كبيرة في ديسمبر 1993م الموجودة في الشكل (2-2) حيث هذه الصورة هي جزءاً صغيراً من الحرف الشمالي الشرقي، وقد تم مسح أكثر من مائة نجم صغير السن في السديم. حيث واحداً منها على الأقل يشكل ريشة ضخمة من الغاز الذي ينفث المادة بعيداً من السديم ويرسل



الشكل (2-1) يبين التركيب لسديم الجبار والسحابة الجزيئية له.

موجات صدمية من خلال السحب حيث هذه تلتهم مناطق على شكل شرائح كبيرة من السديم.

ولذا ينشأ ميلاد النجم أو عدة نجوم على حسب الكتلة السديمية وقد يستغرق ملايين السنين هذا الأمر. حيث تندمج جزيئات الغاز والغبار في تلك السحب الباردة الجزيئية ومنها يبدأ في تشكيل نجم. أيضاً ربما يكون بفعل انفجارات المتجدد الجبار (Supernova) لمجاورته لها أو بتأثير من نجم عابر خلال مرور على حافة السحابة. حيث تبدأ المنطقة ذات الكثافة الأكبر في تكوين شبه القرص وتهوي المادة تجاه مركزه، وبعدما تزيد سرعة لف السحابة حول نفسها (مثل المتزحلق على الجليد وهو يدور على نفسه برجل واحدة) ، وعند نقطة معينة التي تصبح حرارته في المركز عالية بحيث يبدأ الاندماج (الانشطار) النووي (Nuclear Fusion) يبدأ النجم في العمل وهي الحالة الأولى التي تسمى بالنجم البدائي (Proto-Star). يتبقى جزءاً من المادة موجوداً وهو يلف حول النجم ويعكس ضوئه. أحياناً هذه المادة تهوي إلى النجم تنفث على شكل ريشة إلى الخارج فإذا بقي من السديم سوف يشكل الكواكب الأولية (المناطق الأكثر كثافة في القرص) وبمرور الزمن الكافي سوف


الشكل (٢-٦): سديم الجبار

يتشكل شئ يقترب من شكل المنظومة الشمسية، وإذا تخلف شئ ما من السديم فسوف يبتعد في أماكن قصية بمثل ما يفعله حزام كوبر وسحابة أورت للمذنبات في منظومتنا الشمسية (أحياناً يصعب رؤية هذه الأقراص لسهولة سطوع النجوم المجاورة للسديم البارد المتكون من جسيمات ويمكن الكشف عنها بواسطة موجات تحت الأحمر أكثر من الموجات المرئية أو فوق البنفسجية).

ومن حسن حظ أوديل في رؤية هذا السديم لقربه من حرف السحابة ومضاء بنجوم ساخنة صغيرة السن ، والتي تبث قدراً من الضوء فوق البنفسجي الذي بدوره يجعل السحابة الجزيئية تبث الضوء. وتضئ أيضاً سحابة المادة التي تشكل أرضية لميلاد الكواكب المبين التي يسميها أود يل بالكواكب البدائية (Proplyds)، حيث يعد كشف هذه الكواكب البدائية صدفة (لأنه كان يبحث عن سدم لتكوين النجوم) ومنها عثر على الأقراص الكبيرة المفلطحة من المادة التي تتكتل من حولها حيث يقول: (إن هذه الأقراص مثل جيد لأمر كان ينبغي أن نتوقع رؤيته وبمجرد أن فهمنا كنهها، أصبح من الواضح أنه كان ينبغي أن نبحث عنها منذ زمن طويل). حيث كان يعتقد دائماً أننا لسنا وحدنا في هذا الكون الواسع وأن هناك أناساً آخرين يعيشون في كواكب أخرى.

فلقد عثر أود يل وأفراد الطاقم في سديم أوريون على كواكب بدائية حوالي 56 إلى 100 نجم في المنطقة على الرغم لا يمكن توقع رؤية كواكب مطمورة في الأقراص من

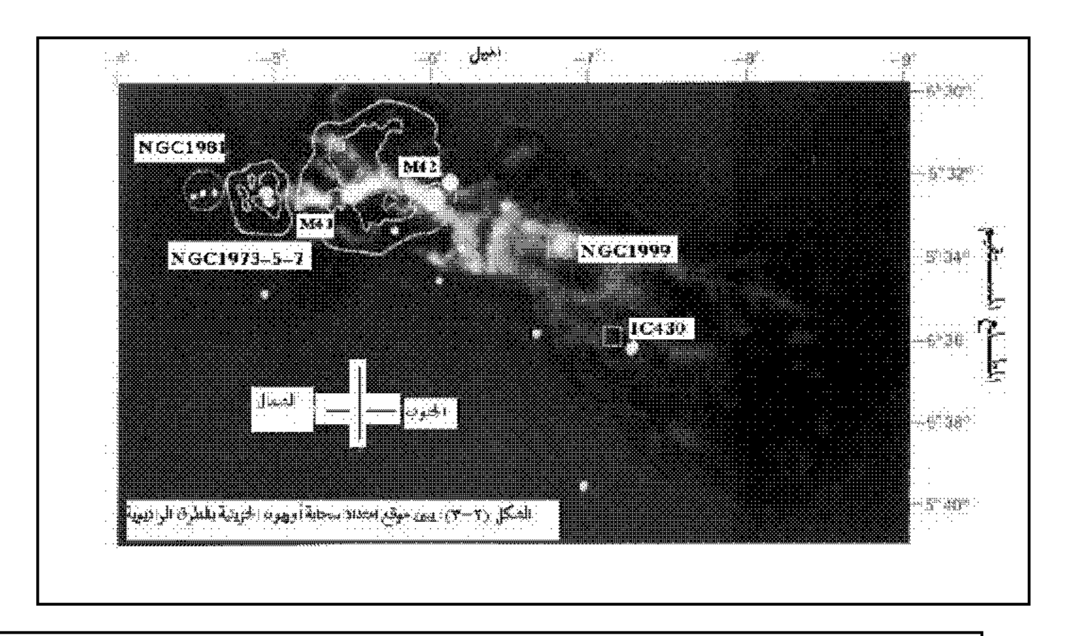
أيضاً لقد استخدم العلماء الطرق الراديوية لرسم خريطة خارج امتداد سحابة أوريون الجزيئية وذلك بالمقارنة مع الرؤية البصرية الشكل (2-3). وأخيراً يقول أوديل إنه كان يأمل في أن تؤدي كل هذه الاكتشافات إلى اكتشاف أشكال أخرى من الحياة.

2- آلة المصور (النجم β) Pictor

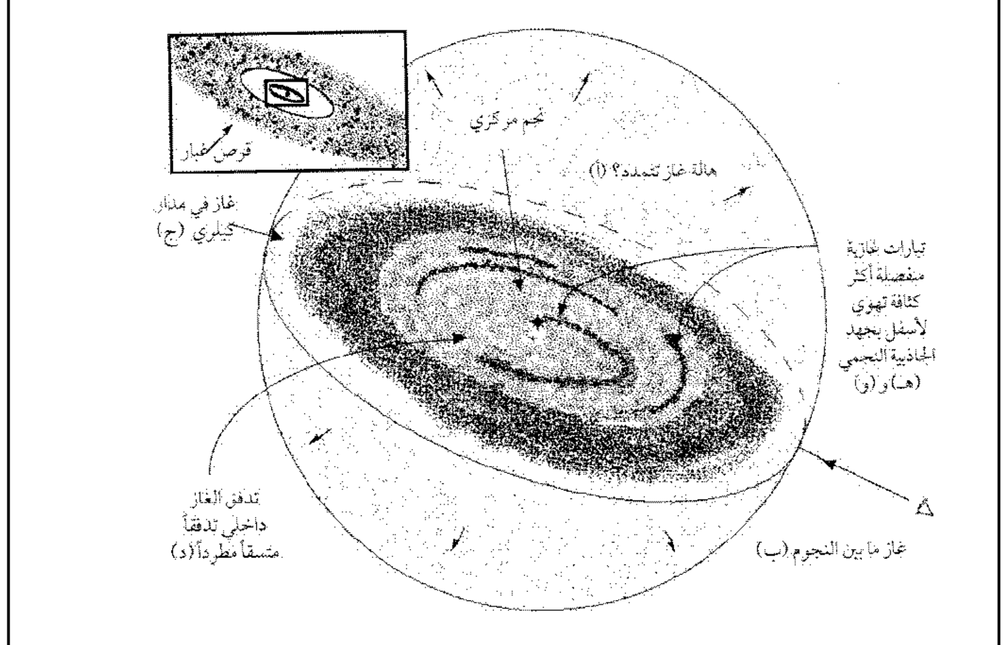
هي عبارة عن كوكبة جنوبية تقع شرق كوكبة القرينة (Carina) وغرب كوكبة أبو سيف (Dorado) وقريبة جداً من نجم سهيل (إلى الغرب منه). وتحتوي على نجمين لامعين هما ألفا وبيتا حيث نجم β من القدر الظاهري 3.9 وتم العثور على أقراص الكواكب الأولية من القرص المحيط بنجم بيتا بكتوريس (Pictoris). وذلك باستخدام تليسكوب بمرصد مونا كي في هاوي حيث تمت دراسته بالقمر الصناعي الفلكي للأشعة تحت الأحمر. حيث أن نجم بيتا بكتوريس يبدو كنجم تحيط به حلقة سحاب من المادة والذي يقع على بعد 54 سنة ضوئية في كوكبة بكتور.

ومن دراسة الأطياف التي تم رصدها و تحليلها للنجم بيتا، أن هناك تكتلات من الغاز تهوي إلى المنطقة المركزية. وأن هناك ما بين (100-150) تكتلاً من المادة تهوي إلى النجم في كل سنة.

ويرى الفلكيون مشهد الكواكب البدائية في كلا سديم أوريون وقرص بيتا بكتوريس يحتمل مراحل مختلفة لنفس عملية تشكيل منظومة النجوم. ولعل عندما يقومون بأرصاد معدودة من هابل أو أي مرصد فضائي آخر ، بأن يجمعوا معاً نموذجاً لمولد النجوم يتضمن هذه المراحل. حيث يبين الشكل (2-4) محاولة تخطيطية لوصف هذه المنظومة حديثة الولادة.



الشكل (٢-٣): يبين موقع امتداد سحابة أوريون الجزيئية بالطرق الراديوية

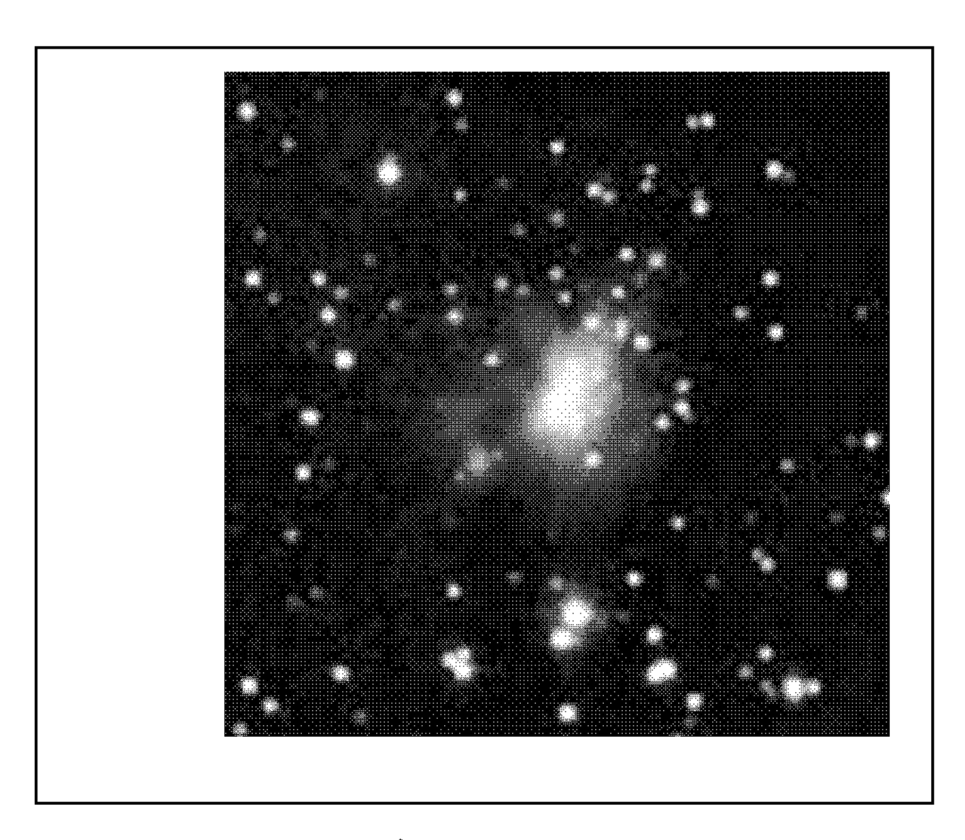


شكل 4-2

4-2 آليات تكوين النجم

تتكون النجوم من انكماش السحب البين نجمة وهي كما يلي :

1) إن الزيادة للكثافة من التصادمات المباشرة لسحب بين وسط النجوم تؤدي إلى التكثف النجمي. وهذا يظهر بسحب الغاز في الدوران المجري العادي. وذلك على حسب النظرية من تلاقي موجات الكثافة للأذرع الحلزونية. ويدور الشكل الحلزوني أكثر بطئاً من الدوران المجري العادي التي تكون سحب الغاز على طول الحواف الخلفية ومن ذلك نرى بعض المجرات الأخرى، أن نجومها الناشئة (Young) ذو سطوع عالي جداً متركز طوال الحواف الخلفية لأذرع تلك المجرات.عند السطح البيني (السطح الفاصل بين منطقتين) بين مناطق HII ومحيط مناطقHI نتوقع نشوء الكثافة المناسبة لتمدد الغاز الحار في مناطق HII. أيضاً نلاحظ أن مقاومة الغاز البارد والغبار في التقدم المواجه للمناطق HII الحارة. وفي مثل هذه المنطقة يبدو الحشد النجمي الناشئ NGC2246 قد تكون حديثاً.
2) إن انعزال السحب المظلمة الصغيرة لكتلة مقدرة والتي تكون من 20 إلى أكثر من 100 كتلة شمسية (مثل الحشود الكروية) ومثال على ذلك الأكثر وضوحاً هو حشد "كيس الفحم" (Coal Sack) هو منطقة مظلمة على درب التبانة في الاتجاه للصليب الجنوبي. أشار العالم الفلكي بارت بوك بمثل هذه الكرويات لسحب محتملة لتصادم الغاز والغبار في النجوم أو نجوم الحشد.
3) تطلق انفجارات المتجدد الجبار (Supernova) الكمية الضخمة من الطاقة على شكل إشعاع كهرومغناطيسي ورياح نجمية عنيفة (وتحصل فيها دورة تسمى 3α) وهذه الطاقة تشبه التمدد للمادة في مناطق لأجل انضغاط محيط المادة في النجم البدائي.
4) إن من بين معظم الأماكن الموجودة للتكوين النجمي هي السحب الجزيئية الباردة. وجزء من طاقتها للجسيمات تكون حالات تنشط للدوران والاهتزاز في الجزيئات. وبعد ذلك تشع هذه الجزيئات الطاقة إلى الفضاء على شكل موجات تحت الأحمر وراديوية. وعلى هذا المنوال تنتقل الطاقة من السحب الباردة وبذلك فإن السحب تنكمش حتى يصبح تجاذباً في السحب غير ثابت ومنها تكون النجم البدائي. أيضاً



الحشد NGC246

2-5 شروط انكماش السحب البين نجمية:

توجد ثلاث نظريات تدرس كيفية الانكماش ، الأولى تقوم على انكماش السحابة البين نجمية بدون الأخذ في الاعتبار وجود المجال المغناطيسي وكذلك دوران السحابة حول محورها العمودي، والثانية تأخذ تأثير المجال المغناطيسي مع إهمال الدوران ، أما النظرية الثالثة تأخذ في الاعتبار دورن السحابة حول نفسها مع إهمال تأثير المجال المغناطيسي. ولا توجد نظرية تدرس الانكماش في حالة وجدود المجال المغناطيسي والدوران لصعوبة حل المعادلات التفاضلية لكثرة المتغيرات بها، والتي يزيد فيها عدد المتغيرات المجهولة عن المعلومة.

بفرض سحابة بين نجمية كروية الشكل كتلتها M ودرجة حرارتها T وكثافتها ρ .
وبفرض أن تأثير الضغط والقوي الخارجية على السحابة يساوي صفر ، فإن شرط الانكماش للنظرية الأولى هو :

$$\rho > (10/M^2)\,(kT/G\mu m_H)^3 \qquad (2\text{-}1)$$

حيث k ثابت بولتزمان و G ثابت الجذب العام و m_H كتلة ذرة الهيدروجين و μ الوزن الجزئي المتوسط للغاز المكون للسحابة.
فمثلاً من المعادلة (2-1) عندما تكون كتلة السحابة البدائية عشر مرات كتلة الشمس ودرجة حرارتها 30 درجة مطلقة والوزن الجزئي المتوسط 2.3 فإن السحابة تنكمش عندما تكون $\rho > 1x10^{-19}\ gram/cm^3$

أما في النظرية الثانية فإن الوضع يزداد تعقيداً ويصبح شرط الانكماش لسحابة كروية الشكل هو :

$$M/\pi BR^2 > (12\pi^2 G/5)^{-0.5} \qquad (2\text{-}2)$$

حيث B شدة المجال المغناطيسي.
وعندما تكون السحابة بيضاوية الشكل فإن الشرط (2-2) يصبح :

$$M > 0.015B^3/\,\rho^2 G^{3/2} \qquad (2\text{-}3)$$

وأخيراً في النظرية الثالثة فإن شرط الانكماش هو :

$$\rho > 3\omega^2/4\,\pi G \qquad (2\text{-}4)$$

حيث ω هي السرعة الزاوية.

6-2 معادلات الانكماش

هناك طريقتين للمعادلات التي تصف حركة الانكماش داخل السحب البين نجمية ، الطريقة الأولى مبسطة وهي تصف فقط الحركة بدون الأخذ في الاعتبار التركيب الكيميائي للسحابة المنكمشة وكذلك التغيرات الفيزيائية . أما الطريقة الثانية وهي التي تصف حركة المادة مع الأخذ في الاعتبار تركيب السحابة الكيميائي والفيزيائي.

الطريقة الأولى :

بفرض أن السحابة كروية الشكل وكتلتها M تقدر بـ $4\pi r_o^3$ وكثافتها البدائية ρ_o و نصف قطرها r_o في حالة اتزان هيدروستاتيكي وفي حالة اتصال حراري بينها وبين الفضاء المحيط بها في وضع متساوي الحرارة isothermal . وبفرض أن كتلة مقدارها M_r ونصف قطرها r تحركت من سطح السحابة في اتجاه المركز تحت تأثير جاذبية السحابة ، فإن تغير الحركة القطرية (أي في اتجاه نصف القطر) radial motion تعطى بالعلاقة الآتية

$$dr/dt = -\{ (8\pi/3)G\rho_o\, r_o^2(r_o/r - 1)\}^{0.5} \qquad (2\text{-}5)$$

الإشارة السالبة في المعادلة السابقة تعني أن نصف القطر في حالة انكماش. بتكامل المعادلة (2-5) يمكن الحصول على مكان المادة المنكمشة بالنسبة للزمن. وهذا الزمن يختلف عن زمن الانكماش الحر free fall time

$$T_{ff} = \{3\pi/32\ .\ 1/ G\rho_o\}^{0.5} \qquad (2\text{-}6)$$

الذي يُحقق الشرط (1) و (2) في حالة انكماش كل أجزاء السحابة في نفس الوقت.

عندما يتغير تركيب السحابة بواسطة الانكماش يتبع ذلك تولد كميات من الطاقة ، وبزيادة الكثافة هذه الطاقة المتولدة يصعب تسربها من مركز السحابة إلى الفضاء وتختزن داخل لب السحابة ، أي تتحول السحابة من حالة تساوي حراري إلى حالة أدياباتية adiabatic ، فأن درجة الحرارة داخل لب السحابة تعطى بالعلاقة الآتية :

$$T = k^\backslash\ \rho^{\gamma-1} \qquad (2\text{-}7)$$

حيث $k^\backslash$ ثابت و γ الحرارة النوعية لمادة السحابة.

مثال (1) : بفرض أن سحابة بين نجمية درجة حرارتها 150 درجة مطلقة وكثافتها البدائية $2x10^{-16}$ gm cm^{-3} وكتلتها 1000 مرة كتلة الشمس في حالة انكماش. لإيجاد عوامل الانكماش فإننا نجد أن : $T_{ff} = 4700$ سنة. أما حساب نسبة نصف القطر السحابة أثناء الانكماش إلى

الطريقة الثانية:

بفرض أن السحابة كروية الشكل وكتلتها M وكثافتها البدائية ρ و نصف قطرها r في حالة اتزان هيدروستاتيكي وفي حالة اتصال حراري بينها وبين الفضاء المحيط بها في وضع متساوي الحرارة isothermal ودرجة حرارتها T والضغط داخلها P و Ψ جهد جذبها الذاتي إلى المركز gravitational potential.

وبفرض أن حركة الغاز داخل السحابة تتبع قوانين حركة السوائل ، وعلى هذا فإن معادلات الحركة داخل السحابة تكون :

معادلة الاستمرارية continuity

$$(\partial \rho/\partial t) + \nabla.(\rho v) = 0.0 \qquad (2\text{-}8)$$

معادلة العزم أو الزخم momentum

$$(\partial \rho v/\partial t) + \nabla.(\rho v v) = \rho\nabla\Psi - \nabla p \qquad (2\text{-}9)$$

معادلة الطاقة energy

$$(\partial \rho E/\partial t) + \nabla.(\rho E v) = -p\nabla.v + L \qquad (2\text{-}10)$$

معادلة جُهد الجذب gravitational potential

هذه المعادلة تعطى بحل معادلة بواسون poisson

$$\nabla^2 \Psi = 4\pi G\rho \qquad (2\text{-}11)$$

حيث v هي متجه سرعة مكونات السحابة من السطح إلى المركز و E هي الطاقة الكلية داخل السحابة و L هو معدل تغير الطاقة بالنسبة لوحدة الحجم نتيجة لإشعاع الطاقة للخارج ويعطى بالعلاقة الآتية

$$L= \nabla.\{(4/3k_R\rho)\, \nabla(\sigma T^4)\qquad (2\text{-}12)$$

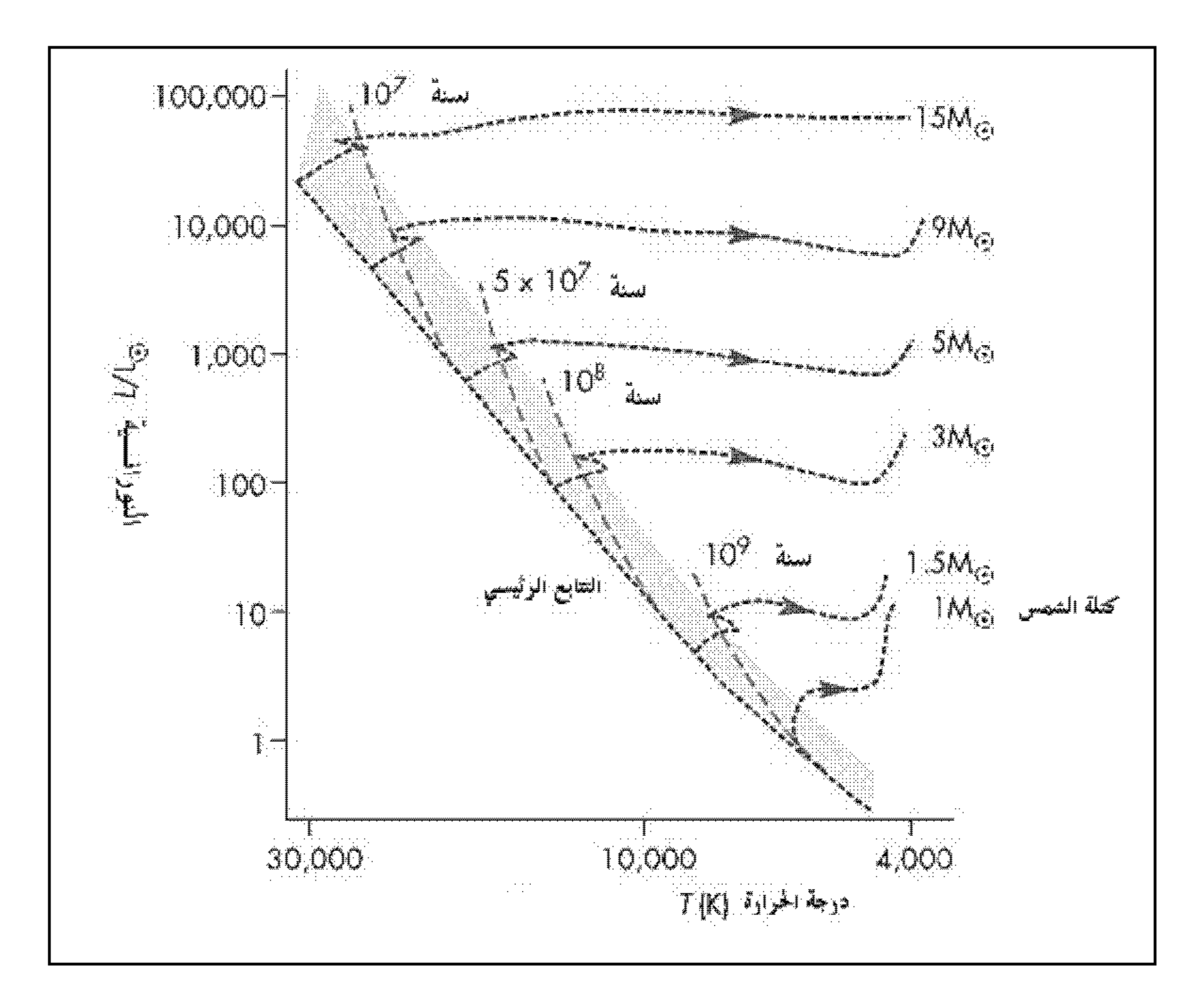
و σ هي ثابت ستيفن بولتزمان و k_R متوسط العتمة داخل السحابة.

يمكن حل معادلات الاستمرارية والعزم والطاقة وجهد الجذب الذاتي في اتجاه نصف القطر فقط في حالة إهمال المجال المغناطيسي وفي اتجاه نصف القطر والمحور العمودي علية في حال وجود المجال المغناطيسي.

مثال (2) : في حالة انكماش سحابة بين نجمية ليس بها مجال مغناطيسي وكتلتها تساوي كتلة الشمس ودرجة حرارتها البدائية عشر درجات مطلقة ، والكثافة البدائية $\rho=1.5x10^{-13}$ gm/cm^{-3} و كمية العتمة opacity تأخذ من بحث كوكس وتابر Cox and Tabor (1976) وبفرض أن التركيب الكيميائي لسحابة هو نسبة كتلة ذرة الهيدروجين إلى كتلة السحابة الكلية تساوي 0.2 و نسبة كتلة ذرة الهليوم إلى كتلة السحابة الكلية تساوي 0.7 و نسبة كتلة ذرات العناصر الثقيلة إلى كتلة السحابة الكلية تساوي 0.1 . بحل المعادلات نحصل على العلاقة بين درجة الحرارة والكثافة وكذلك على العلاقة بين الكثافة ونصف القطر المنكمش . و عندما تصل كثافة اللب المنكمش 10^{-4} تصل درجة الحرارة داخل السحابة إلى 200 ألف درجة مطلقة في زمن قدرة حوالي 10^{6} سنة ، وبزيادة الكثافة يصبح اللب مخزن حراري وترتفع درجة الحرارة بسرعة رهيبة حتى تصل إلى ما بين خمس عشر وعشرين مليون درجة مطلقة مما يجعل التفاعلات النووية تبدأ في اللب وتتحول أربع ذرات هيدروجين إلى ذرة هليوم والفرق في الكتل يتحول إلى طاقة تبعاً لقانون اينشتين $E=mc^2$ ، حيث m كتلة ذرات الهيدروجين المتبقية من التفاعل و c سرعة الضوء. وبهذا يبدأ النجم في الظهور في السماء ويقال ولد النجم.

لا نستطيع أن نرصد ميلاد النجم في الأطوال الموجية المرئية ، ذلك لأن السحابة البين نجمية المحيطة تحجبه عن الرؤية. وتمتص هذه السحابة كميات عظيمة من الطاقة الخرافية التي يصدرها النجم في نطاق الضوء المرئي ، ومن ثم ترتفع درجة حرارتها إلى بضعة مئات من الدرجات المطلقة. ويعيد الغبار الموجود في السحابة هذا الإشعاع مرة أخرى في نطاق تحت الأحمر. وبالتالي فإن الأرصاد في نطاق تحت الأحمر تمكنا من دراسة ما يحدث في مرحلة تكون النجم.

ويصاحب ميلاد بعض النجوم قذف كميات كبيرة من الطاقة ، وتسمى هذه النجوم بنجوم T الثور. وسبب التسمية أنها اكتشفت أولا في كوكبة الثور. يعتبر سديم الجبار الذي يبعد عن الأرض بـ 1500 سنة ضوئية وتبلغ كتلته 300 مرة كتلة الشمس ، منطقة تفريخ



الشكل (2-5): يبين مسار النجم حين ظهوره على خط التتابع الرئيسي. أيضا يبين العمر البدائي للنجم على خط التتابع الرئيسي(ZAMS).

7-2 الوصف الفيزيائي لعملية الانكماش

يطلق علي هذه المرحلة من التطور بتطور النجوم فيما قبل التتابع الرئيسي pre- main-sequance. و لقد وجد أن الطاقة الموجودة بداخل النجم تنتقل بفعل تيارات الحمل الحراري لا بالإشعاع. فلقد كان هناك عالم ياباني هو سي هاياشي فيزيائي فلكي رأى أن النجوم تتحرك على مسار التتابع الرئيسي تحركاً رأسياً من أسفل التتابع الرئيسي إلى مناطق مشغولة (إلى أعلى) بنجوم عملاقة حمراء. وتنص نظريته عندما تنكمش النجوم في المراحل الأولى لتطورها بواسطة الانكماش التجاذبي للمادة (سميت هذه العملية بواسطة عالمان كلفن وهيلموهلتز) المكونة للسحابة التي سوف تكون الأجنة النجمية ، والتي تحتوي على كتلة وتركيب كيميائي معين وبعد ابتعاد الغاز والغبار المحيط بالنجم بفعل الرياح النجمية تبدأ بالاقتراب من المسار السفلي الأيمن للتتابع الرئيسي وهو ما يسمى بمسارات هاياشي أو المسارات التطورية للنجم (Evolutionary Tracks) وبها تبدأ حياة النجم، كما هو مبين في الشكل(2-5).

وتبدأ قصة حياة النجم عند حالة انكماش سحابة كتلتها كتلة الشمس وينطبق عليها نظرية اتزان القوى (Virial) للانكماش فإن

$$3\mathcal{R}T/\mu < 3/2\ GM/R \qquad (2\text{-}13)$$

$$\rho > 3/4\pi\ (2R/\ \mu\ G)^3\ (T^3/M^2) \qquad (2\text{-}14)$$

حيث R نصف قطر السحابة ، و M كتلة السحابة، و T درجة حرارة السحابة، و G ثابت الجذب العام، و μ متوسط كثافة الغازات المكونة للسحابة و $\mathcal{R}$ الثابت العام للغازات. تشير الدراسات لتكثف سحب ما بين النجمية درجات حرارتها حوالي 20K و كتلتها $M = 2 \times 10^{33}$ g فإن كثافتها تعطي $\rho > 3 \times 10^{-18} g.cm^{-3}$ ، و زمن الانكماش إلى كثافة عالية عند معدل السقوط الحر هو

$$t \sim (6\ \pi\ \rho G)^{-1/2} \qquad (2\text{-}15)$$

ومن الكثافة المعطاة يكون زمن الانكماش أكبر أو يساوي 2×10^{4} سنة.

خلال الاتزان؛ قبل بدأ الانكماش؛ الضغط في السحابة متساوية الحرارة (Isothermal) يزداد نحو المركز. ومن المعادلة (2-13) نرى الانكماش أسرع وأكثر تكثف نحو المركز من الجزء الخارجي ويصبح العمق البصري (Optical Depth) بفعل حبيبات الغبار بالسحابة

$$\tau = \pi a^2 Q n_g R \qquad (2\text{-}16)$$

حيث $\pi a^2 Q$ هو المقطع البصري، و n_g كمية الكثافة للحبيبات. ومن قانون فين (Wine's law)

$$\lambda_m T = 0.29 \qquad (2\text{-}17)$$

عندما تكون درجة الحرارة $T=20K$، والطول الموجي $\lambda_m = 0.14$ mm ، فإن المقطع البصري يساوي $10^{-16}cm^{-2}$ عند هذا الطول الموجي. وبما أن $n_g/n_H \simeq 10^{-12}$ ، و من المعادلة (2-16) يصبح العمق البصري يساوي واحد لسحابة كتلتها كتلة الشمس . وعندما ترتفع الكثافة داخل السحابة من $3x10^{-18}$ g cm^{-1} إلى 10^{-10} g.cm^{-3} ، فإن طاقة الجاذبية في مرحلة ما قبل النجم

$$\Omega = 3/5(GM^2/R) = 2\times10^{48}\rho^{1/3}(M/M_\odot)^{5/3} \qquad (2\text{-}17)$$

حيث $M_\odot$ كتلة الشمس. و وعندما تساوي كتلة السحابة كتلة الشمس ، $M = M_\odot$ ، والكثافة $\rho = 10^{-10}$ g.cm^{-3} تصبح طاقة الجاذبية

$$\Omega = 4.3\times10^{45}\ \text{erg} \qquad (2\text{-}18)$$

غالباً ما يقع التسخين بداخل المادة بواسطة زيادة العتامة ، وتنطلق طاقة الجاذبية بواسطة الانهيار (الانكماش) المستمر والذي يؤدي إلى تسخين الغاز ، لذا تعطى الطاقة الحرارية الداخلية للسحابة بـ

$$u = 3/2\,(\mathcal{R}/\mu)\,TM \qquad (2\text{-}19)$$

بتسخين الغاز إلى درجة حرارة قدرها 10^4K تنطلق طاقة قدرها 2.5×10^{45} erg. عندما تصل درجة الحرارة إلى 10^4K تصبح التصادمات بين ذرات الهيدروجين قوية وكافية لتأينها. وحين يتأين الهيدروجين تكون الطاقة 13.6 eV والطاقة المطلوبة لتأين كل الغازات في داخل النجم الوليد هي

$$E(Ion) = 2.6 \times 10^{46} (M/M_\odot) \text{ erg} \quad (2\text{-}20)$$

باستخدام المعادلة (2-20) فإن الزيادة في الكثافة من 4×10^{-18} gcm^{-3} إلى 4×10^{-10} g.cm^{-3} سوف تنطلق طاقة الجاذبية المطلوبة.

وعند هذه الحالة فإن نصف القطر للنجم الأولي يكون $270R_\odot$. وتصبح درجة حرارة السطح تقريباً 4500K وتنتقل الحرارة نحو الخارج غالباً بواسطة الحمل الحراري ويتحرك النجم على المسار التطوري. وعند ثبوت الكتلة والتركيب الكيميائي على التتابع الرئيسي فإن لمعانية النجم الحقيقة (الضياء أو النورانية) luminosity تكون

$$L \propto R^{-0.5} \quad (2\text{-}21)$$

حيث أن $L \propto R^2 T_e^4$ و هذا يعني أن

$$L \propto T_e^{0.8} \quad (2\text{-}22)$$

وعند شبة الاتزان الهيدروستاتيكي ، فإن درجة الحرارة تكون

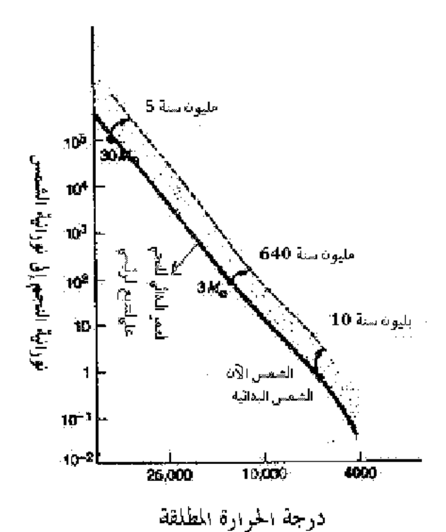
$$T \propto R^{-1} \quad (2\text{-}23)$$

واللمعانية

$$L \propto R^2 T_e^4 \sim T_e^2 \quad (2\text{-}24)$$

وبذلك يبدأ النجم في الاقتراب البطيئ من التتابع الرئيسي.

لذلك عندما يأخذ النجم الأولي موقع ما على التتابع الرئيسي فإن هذا الموقع الذي ظهر عليه يسمى بالعمر البدائي للتتابع الرئيسي للنجم ZAMS (Zero Age Main Sequence) الخط المتصل من الشكل(2-6). والذي غالبية النجوم تقضي جل حياتها عليه حوالي 90% وهذا وفقاً لنجوم متجانسة التركيب الكيميائي.



الشكل (2-6): يبين موقع العمر البدائي للنجم على خط التتابع الرئيسي

وأخيراً التوقف على التتابع الرئيسي بداية لتوليدالطاقة النووية ، أي أنه عندما تبدأ السحابة التي

تقدر كتلتها بكتلة الشمس أو اقل قليلا في الانكماش حتى تزداد كثافتها وبالتالي تزداد قوة جاذبيتها فتنشط آلية الانكماش أكثر فأكثر. وتبدأ الكتلة المنكمشة في التسخي ن ويأخذ غاز المناطق المحيطة بها في الدخول إلي طور جنين النجم proto-star فتزداد كتلته. وتأتي الزيادة في درجة الحرارة من تحول طاقة الوضع potential energy إلي طاقة حرارية thermal. وحتى هذه المرحلة لا تكون درجة حرارة النجم الأولي قد ارتفعت بالقدر الذي يسمح بالإشعاع في نطاق الطيف المرئي ، وإنما يمكن أن يتم الإشعاع في النطاق تحت الأحمر. ومع مرور الزمن تزداد كثافة المادة في مركز السحابة إلي أن تصل إلي مرحلة لا تسمح للأشعة تحت الحمراء أن تخرج منها . وعند هذه اللحظة يصبح مركز السحابة كمخزن

$^{1}H + ^{1}H \rightarrow D + e^{+} +$ نيوترينو + (1.179 M ev طاقة قدرها)

وهذا التفاعل يساعد علي ارتفاع درجة الحرارة ، لأنه في جزء من الثانية من هذا التفاعل يصطدم البوزيترون مع الإلكترون العادي فيتلاشيان معا وينبعث عنهما قدر من الطاقة مساو لمجموع كتلتيهما.

وأيونات الديوتريوم الناتجة في بضع ثواني تبدأ في التفاعل مع بروتون أخر، فتصبح ثلاثة بروتونات معا. ويتحول أحدهما إلي نيوترون فاقدا شحنته وتتكون نواة خفيفة للهليوم-3 ^{3}He وخروج فوتون

$D + ^{1}H \rightarrow ^{3}He +$ **فوتون** + (5.493 M ev طاقة قدرها)

وبهذا التفاعل تتحرر بعض الطاقة فتعمل علي زيادة درجة الحرارة الداخلية للنجم.

وسواء حدث تفاعل الديوتريوم أو لم يحدث فإن درجة الحرارة تستمر في الصعود ولكن ببطء بعض الشيء . وعندما تصل درجة الحرارة إلى خمس عشر مليون درجة مطلقة تبدأ التفاعلات النووية في الاشتعال بدورة البروتون-بروتون proton-proton interaction لإنتاج نوى هليوم من نوى الهيدروجين . وفي هذه الدورة يتم تكوين الهليوم من خلال أحد ثلاث دورات. **والدورة الأولي** تتكون من ثلاث خطوات يمكن وضعها حسب المعادلات الآتية :

$^{1}H + ^{1}H \rightarrow ^{2}H + e^{+} +$ **نيوترينو** + (1.179 Mev طاقة قدرها)

$^{2}H + ^{1}H \rightarrow ^{3}He +$ **فوتون** + (5.493 Mev طاقة قدرها)

$^{3}He + ^{3}He \rightarrow ^{4}He + ^{1}H + ^{1}H$ + (12.859 Mev طاقة قدرها)

وفي هذه العملية يتم إنتاج الهليوم-4 ^{4}He وخروج بروتونين وفوتون طاقة. وهذه هي الدورة الأساسية لإنتاج الطاقة في كل النجوم الصغيرة . وبحدوث ذلك يكون النجم الأولي قد أصبح

أما الدورة الثانية لتكوين الهليوم فهي

$^{3}He + ^{4}He \rightarrow ^{7}Be +$ **فوتون** + (1.586 Mev طاقة قدرها)

$^{7}Be + e \rightarrow ^{7}Li +$ **نيوترينو** + (0.061 Mev طاقة قدرها)

$^{7}Li + ^{1}H \rightarrow ^{4}He + ^{4}He +$ (17.347 M e. v طاقة قدرها)

ففيها تتفاعل نواة هليوم-3 مع نواة هليوم-4 فينتج نواة بيريليوم-7 ^{7}**Be** مع إشعاع فوتون. وعن طريق امتصاص إلكترون يتحول ^{7}Be إلي نواة ليثيوم-7 ^{7}Li مع إشعاع نيوترينو. وبتفاعل ^{7}Li مع بروتون تنتج نوتان من هليوم-4 . وحتى تبدأ هذه الدورة لابد أن تكون نويات هليوم-3 قد تكونت بالفعل. أي لابد أن تكون الخطوتان الأوليان من الدورة الأولى قد تمتا.
والدورة الثالثة تأتى بعد الخطوة الأولى من الدورة الثانية

$^{7}Be + ^{1}H \rightarrow ^{8}B +$ **فوتون**+ (0.135 Mev طاقة قدرها)

$^{8}B \rightarrow ^{8}Be^{*} + e^{+} +$ **نيوترينو**+ (15.78 Mev طاقة قدرها)

$^{8}Be^{*} \rightarrow 2\,^{4}He +$(0.095 Mev طاقة قدرها)

حيث يتفاعل بيريليوم-7 مع بروتون وتنتج نواة بورون-8 وخروج طاقة . ونواة البورون -8 غير مستقرة فتتحلل مع انطلاق بوزيترون ونيوترينو إلي نواة بيريليوم-8 المثارة ، وهذه بدورها تتحلل إلي نواتي هليوم-4 .

ومن شأن الطاقة المنطلقة من دورة بروتون-بروتون أن تحفظ للب النجم حرارته وتنتج له القدرة علي التصدي للانكماش ما دامت إمدادات وقود الهيدروجين باقية.

8-2 الحــشود النجميــة:

قبل الحديث عن حياة النجم على التتابع الرئيسي، هناك سؤال يطرح، هل تعيش النجوم فرادى أم على شكل مجموعات في الظلمة الكونية العميقة؟!

إن النجوم في الحقيقة لا تميل إلى التجمع ولكن بفعل الجذب الثقالي الذي يدفع الأجسام إلى التجاذب مع بعضها البعض. إذا الجذب الثقالي قوة كونية عامة حيث هي المسؤولة عن ضم أرجاء الكون على الرغم ضعفها الشديد من بين القوى الأربع.

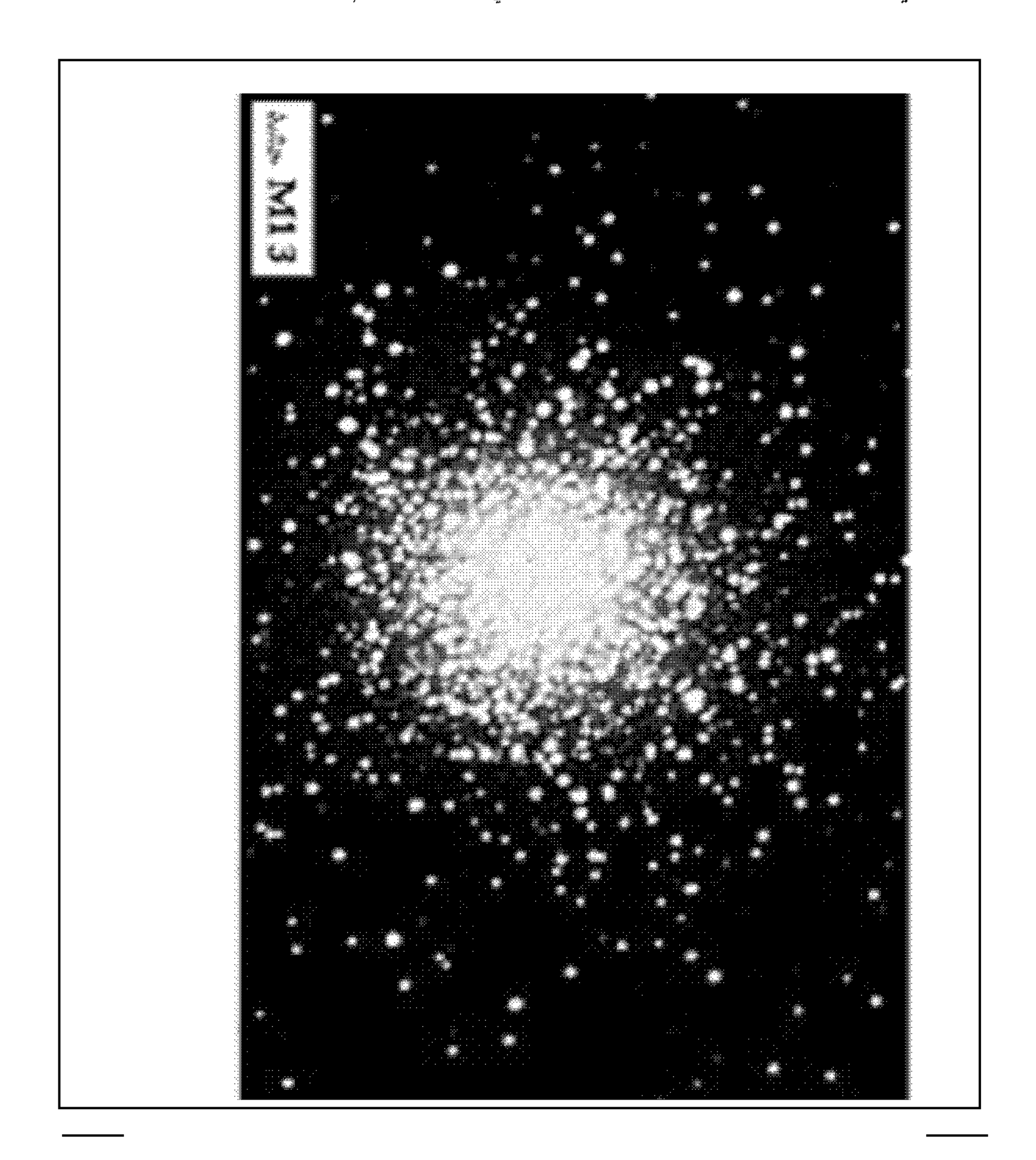
لقد تبين أن غالبية النجوم تتصف بالنجوم الثنائية ونادراً ما تكون منعزلة والتي تبدو وكأنها تتبع مساراتها الخاصة خلال الفضاء وتسمى هذه النجوم بنجوم المجال(مثل الشمس)، ومثل النجوم الثنائية، النجم الثنائي الغول. وكذلك توجد هناك نجوم ثلاثية النظام، وأيضاً هناك عدة نجوم تدور حول مركز الكتلة المشتركة بينها. وهناك مجموعات أكبر تسمى عناقيد (حشود) نجمية، وتتشكل من حشود كروية وحشود مفتوحة وكذلك هناك شكلاً آخر يعرف باسم المترافقات.

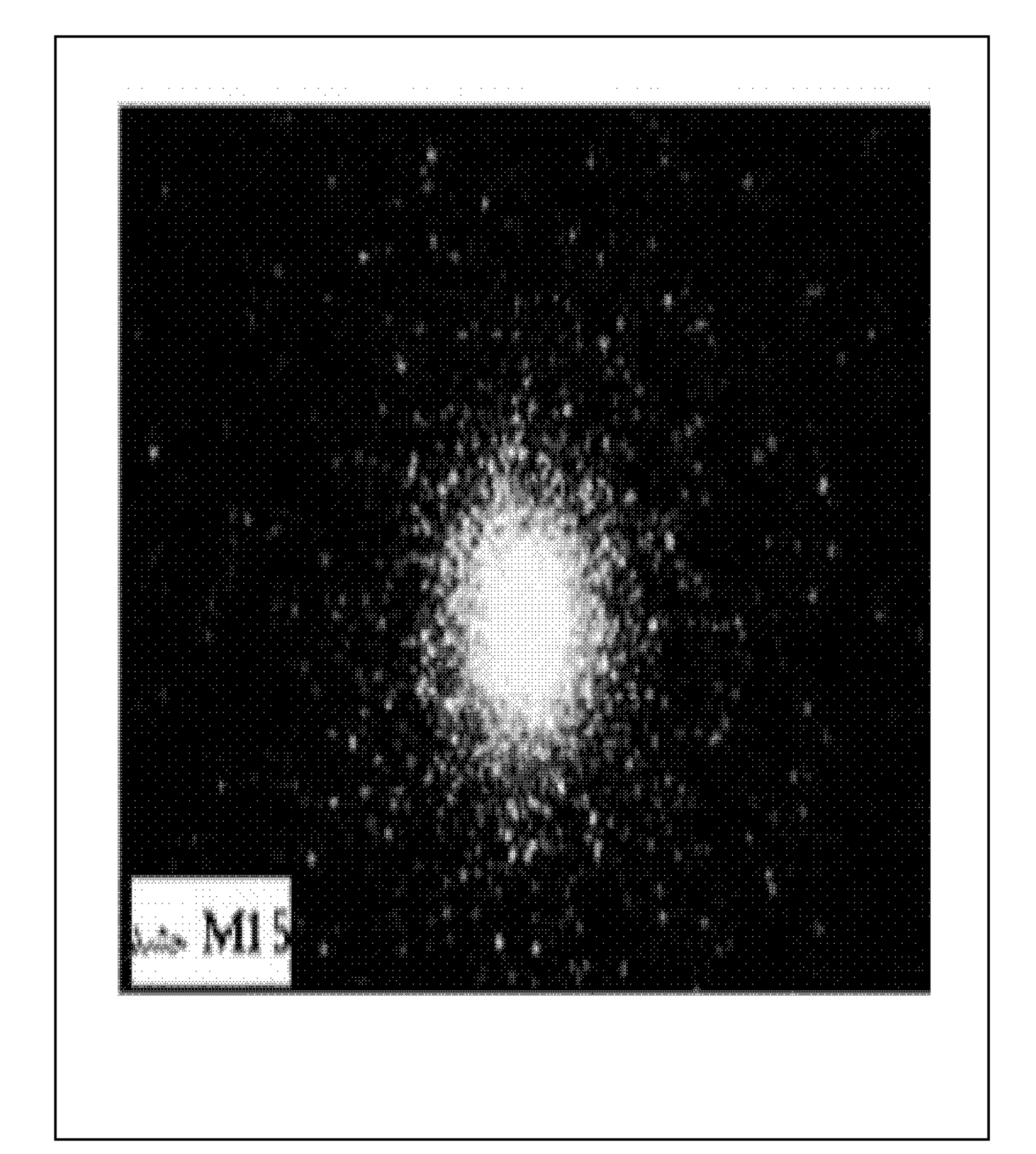
1- الحشود الكروية :

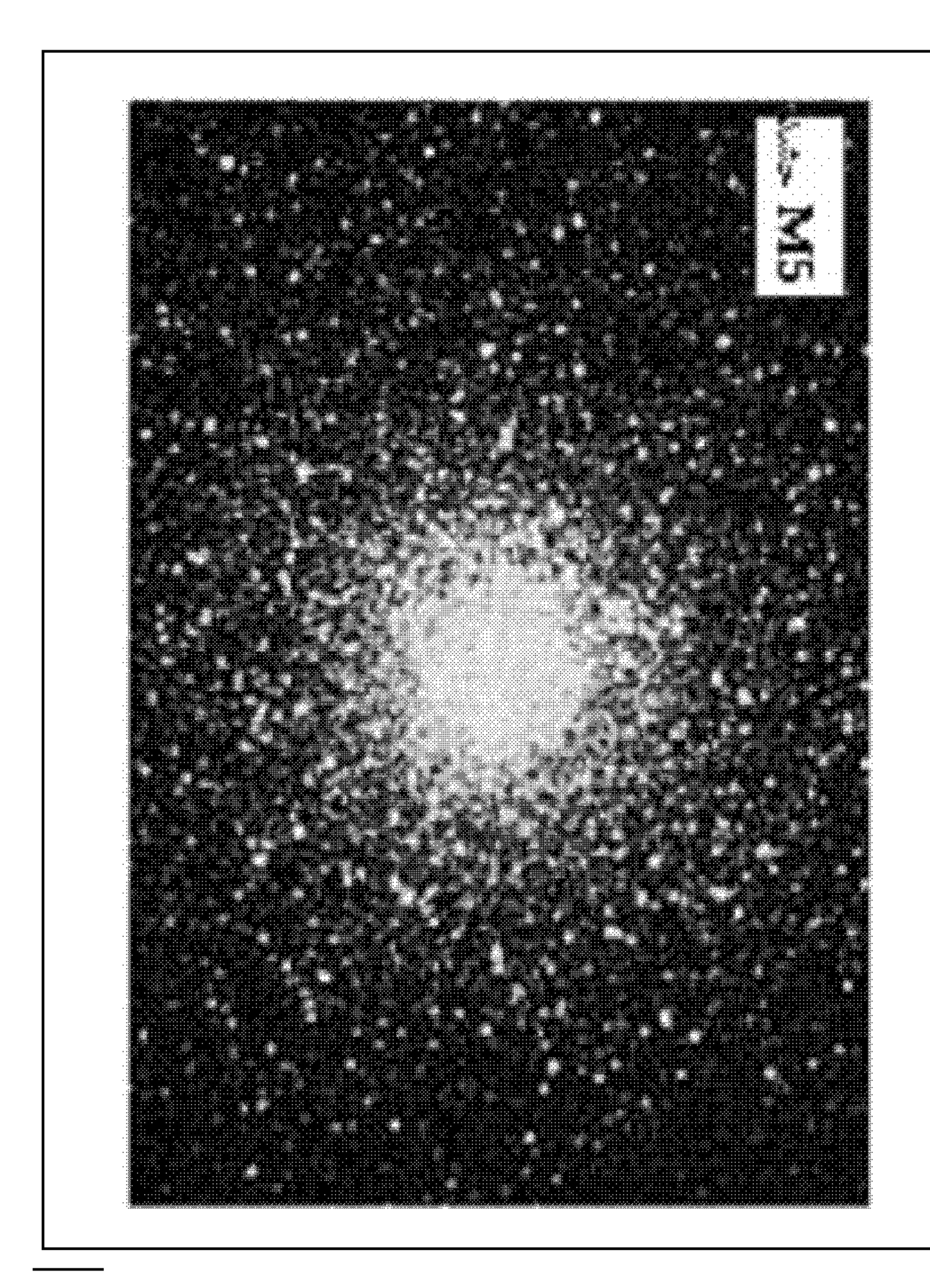
الحشد الكروي Globular Cluster عبارة عن نظام يتكون من عدة مئات من آلاف من النجوم الخافتة – الغالبية الخافتة- ضمن تشكل أقرب إلى الكرة وتتناقص كثافة النجوم من المركز إلى خارج الحشد تدريجياً، ونجد أن هناك نجوم تسمى بنجوم الحقل(هي تلك التي ترى في نفس المنطقة من السماء إذا نقل الجمع منها) مركبة على الجمع الكروي الذي لا يمكن تحديد محيط الجمع – هناك طريقة تسمى بالنقطة المتقاربة (Convergent point).

وتتوزع هذه الحشود بدورها ضمن سحابة كروية تحيط بالمجرة (الهالة). فلقد تم جدولة أكثر من 200 حشد كري في مجرتنا حيث تتحرك هذه الحشود خلال سحابتها الكروية حول مركز المجرة. ولقد تكونت معظم الحشود الكروية خلال ألف مليون سنة من عمر المجرة وتضم تلك الحشود أقدم النجوم في المجرة(نتساءل لماذا تكون لامعة إذاً ؟!) أمثال النجوم العملاقة الحمراء، ويتراوح قطر كل حشد تقريباً 50 بارسك أو أكثر.

مثل تلك الحشود الحشد الكروي الذي يعرف بـ M13 ويقع في كوكبة الجاثي (هرقل) ويبعد عنا 2400 سنة ضوئية، ويحتوي على أكثر من 100ألف نجم. تكاد الحشود الكروية تنحصر في قطبي الكرة السماوية للمجرة. وتسمى أيضاً بـ (NGC 6205) وهي في النصف الشمالي للكرة السماوية.


M13


M15


M5

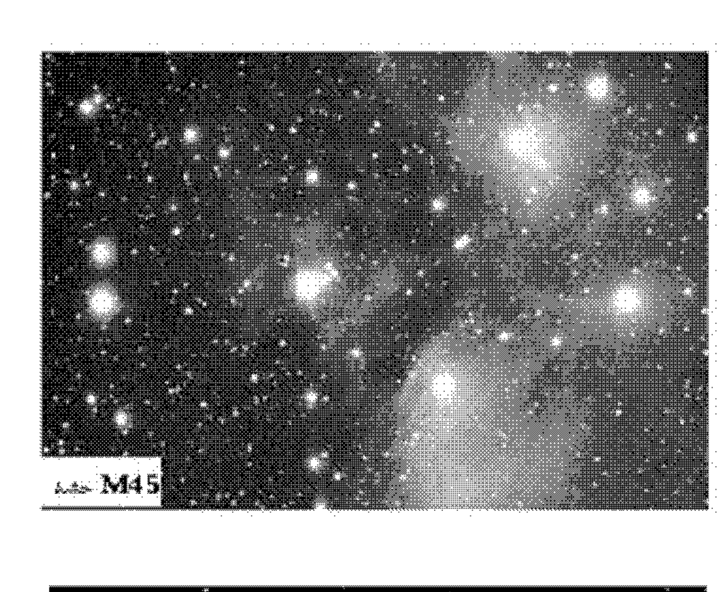
هناك حشد يعرف بـ M15 (NGC 7078) في كوكبة الفرس الأعظم (Pegasus) ويرى كبقعة ضبابية ويوجد فيه سديم كوكبي الشكل(2-1). أيضاً هناك حشد M5 (NGC 5904) في كوكبة الثعبان (Serpens) .

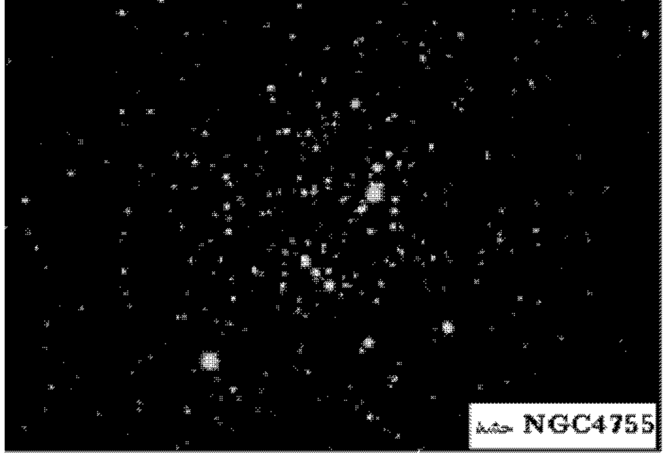
2- الحشود المفتوحة

الحشد المفتوح Open Clusters هو عبارة عن حشد يضم عدة مئات من النجوم وغالبيتها تقع في قرص المجرة – لذلك سميت بالحشود المجرية- لذا النوع من هذه الحشود ليس لها هيئة واضحة، حيث تعتبر هذه الحشود أحدث في تكوينها من الحشود الكروية. لذا فإن مصير هذه الحشود الاندثار خلال ملايين السنين، ويساعد على ذلك التحلل بفعل الجذب الثقالي للأجسام الأخرى الخارجة عنها.

يعرف من هذه الحشود حوالي 250 حشد مفتوح وتشترك المجموعة بتوجه عام في حركاتها الذاتية وسرعتها القطرية ومن أطيافها النجمية يمكن تعيين أعضاء هذا الحشد في حدود عشرات من الكيلومترات في الثانية، وتتراوح أقطارها في ما بين (30-20) بارسك.

ومن الأمثلة على ذلك حشد القلائص (Hyades) الذي في شرق حشد الثريا في برج السرطان (Praesepe). أيضاً حشد الثريا (Pleiades) في برج الثور ويعرف بـ M45 (NGC 1432) ويبعد عن الشمس 400 سنة ضوئية وترى فيه ستة –أو سبعة - نجوم زرقاء بالعين المجردة ويرتفع هذا العدد باستخدام آلات الرصد إلى 700 نجم تقريباً. أيضاً حشد صندوق الجوهرة (Jewel Box) يعرف بـ (NGC 4755) في كوكبة الصليب الجنوبي يبعد عن الأرض 7600 سنة ضوئية.


M45


NGC4755

3- المترافقات

تشبه المترفقات Associations الحشود المفتوحة في عدم وضوح الشكل الهندسي لها، ولكن تتميز عن الحشود المفتوحة والكروية بملاحظة كثافة أكبر للنجوم في حقل معين للرؤية حيث أقل تماسكاً ولذا هناك عدة خواص:

1) تحتوي المترافقات أساساً على نجوم من النوع الطيفي O,B للتتابع الرئيسي الساخنة والحديثة العمر، بينما الأخرى تحتوي عل نجوماً معظمها من الرتب الطيفية الأخرى.

2) أن الأعضاء النجمية لمترافقة لا تكون قريبة لبعضها البعض أكثر من النجوم الأخرى في السماء – يجب التأكد عن وجود الترافق بواسطة قياس أبعاد النجوم O,B في منطقة معينة من السماء وإثبات ما إذا كانت مجموعة منها تنتمي تقريباً لنفس الجزء في المجرة- بينما الحشود الأخرى عندما ينظر الراصد لجزء من السماء فإنها تبدو واضحة كتركيزات من النجوم.

3) يمدد مترافق ما- أي أن الأعضاء تتحرك بعيداً عن مركز المجموعة – لذا أننا نلاحظ وجود فقط النجوم ذات العمر الصغير في المترافقات أيضاً تدل على هذه المجموعات حديثة التكوين نسبياً. أي أنها أقل تماسكاً من الحشود المفتوحة، ولذا يصل قطرها إلى 700 سنة ضوئية بينما البعد الأعظم للحشد المفتوح إلى حوالي 40 سنة ضوئية، في حين يبلغ القطر المتوسط للحشد الكروي 200 سنة ضوئية.

الفصل الثالث

خواص النجوم الطبيعية

3-1 لمعان وأقدار النجوم

إن النظر إلى السماء في ليلة مظلمة صافية يبين لنا أن النجوم تختلف فيما بينها في اللمعان ، فهناك نجوم لامعة ونجوم خافتة لا تكاد ترى بالعين المجردة. ولقد فطن القدماء إلى أن اختلاف لمعان النجوم Stellar Brightness يرجع إلى اختلاف حقيقي وإلى اختلاف ظاهري يعتمد على أبعدها.

Stellar Brightness

لذا أخترع هيباركس ، الفلكي الإغريقي منذ أكثر من ألفين عام قدر Magnitude النجم (m) للتعبير عن لمعانه (b). حيث وضع هيباركس القدر الأول لألمع نجوم السماء ، والقدر الثاني للنجوم التي يكون لمعانها نصف لمعان الأولى تقريبا ، وهكذا حتى القدر 6 وهى أخفت النجوم التي نستطيع رؤيتها. و بعد استخدام المناظير وسع الفلكيون نظام هيباركس ليشمل النجوم الخافتة جدا والتي ترى فقط بالمناظير. و يطلق على القدر بهذه الطريقة أسم القدر الظاهري لأنها تصف إلى أي مدى يكون لامعاً بالنسبة للراصد من الأرض ، والقدر الظاهري هو مقياس للطاقة الضوئية التي تصل إلى الأرض . أو هو إحساس العين بلمعان النجم في نطاق الضوء الأخضر والأصفر ، وهذا النطاق يكون حول الطول الموجي 540 نانو متر . وهذا الإحساس هو عملية فسيولوجية تتوقف على الجهاز العصبي للعين وكيف يعمل. ولقد وجد علماء الفسيولوجيا أن الفروق المتساوية بين أقدار النجوم تناظر نسباً متساوية بين لمعانها.

وبهذا في القرن التاسع عشر ،بدأ الفلكيون في تعريف مقياس القدر بصورة أدق أوضحت قياساتهم ، أن المعان الظاهري لنجم (b1) من القدر الأول يماثل مائة مرة لمعان نجم من القدر السادس (b6). أي أن $b1/b6=100$. وبالتالي فالنسبة بين المعان الظاهري لنجمين متتاليين في القدر تعطى بـ $b1/b6=(100)^{1/5}=2.5$.

ولقد تم وضع علاقة رياضية تجمع بين قدر النجم الظاهري ولمعانة على النحو التالي:

$$m = C - 2.5 \log(b)$$

حيث C ثابت المقياس الصفري لأقدار النجوم.

ومن العلاقة السابقة أمكن وضع علاقة توضح النسبة بين لمعان نجمين x و y

$m_y - m_x = 2.5 \log(b_x/b_y)$ أو $b_x/b_y = 2.5^{(my-mx)} = 10^{0.4(my-mx)}$ (3-1)

يخبرنا القدر الظاهري للنجم عن كيفية ظهوره لأعيننا. بفرض أن L هي كمية الطاقة الصادرة من كامل سطح النجم في الثانية الواحدة ، فإن نورانية النجم الحقيقيه stellar luminosity يمكن حسابه باستخدام قانون ستيفان بولتزمان

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4 \qquad (3\text{-}2)$$

حيث R نصف قطر النجم. أما اللمعان الظاهري لهذا النجم يساوي

$$b = \frac{L}{4\pi d^2} \qquad (3\text{-}3)$$

حيث d نصف قطر الدائرة التي مركزها النجم ويقع الراصد على محيطها. وهذه العلاقة تعطي أيضاً كمية الطاقة التي تعبر كل واحد متر مربع من مساحة سطح الدائرة المحيطة بالنجم في الثانية الواحدة ، ووحدتها جول م$^{-2}$ ث$^{-1}$. وتسمى بقانون التربيع العكسي.

لكن لكي نفهم خواص النجوم بدقة ، يجب معرفة حقيقة لمعان هذه النجوم. لهذا أخترع الفلكيين طريق آخر لقياس كمية الطاقة الإشعاعية الصادرة عن النجوم و أطلقوا عليها القدر الحقيقي أو القدر المطلق.

القدر المطلق (M) لنجم هو قدر النجم الظاهري إذا وضع عند مسافة قدرها 10 بارسك من الأرض .

بتطبيق قانون التربيع العكسي ، تمكن الفلكيون من إيجاد علاقة تعكس سلوك أقدار النجوم . تربط هذه العلاقة بين القدر الظاهري (m) والقدر المطلق (M) والمسافة من الأرض (d) مقدرة بالبارسك ، على الصورة :

$$m - M = 5 \log d - 5 \qquad (3\text{-}4)$$

والبارسك هو بعد الجرم السماوي عن الشمس زاوية اختلاف منظرة تساوي 1 ثانية قوسيه. وهو يساوي $2\text{x}10^5$ وحدة فلكية. ويساوي أيضاً 3.26 سنة ضوئية. وزاوية اختلاف المنظر p تساوي 1/d

من المهم أن تعرف ، أنه لو أمكنك معرفة متغيرين مثل القدر الظاهري والمسافة لأمكنك حساب المتغير الثالث (في هذه الحالة القدر المطلق) . على سبيل المثال ، يستطيع

$$d = 10^{(m - M + 5)/5} \qquad (3\text{-}5)$$

تسمى الكمية ($m - M$) المعامل المسافي للنجم من الأرض . تكبر المسافة كلما كبر المعامل المسافي.

يفضل العلماء الحديث عن لمعان النجوم أكثر من التحدث بلغة الأقدار ، لأن اللمعان هو مقياس مباشر لكمية الطاقة الصادرة عن النجم . و يعبر الفلكيون عن لمعان النجوم بدلالة لمعان الشمس ($L_\odot$) و التي تساوى $3.9x10^{26}$ وات . يصل بريق ألمع النجوم (القدر المطلق لها -10) إلى 10^6 مرة قدر لمعان الشمس ، بمعنى أن أي من هذه النجوم يشع من الطاقة مليون مرة قدر الشمس . أقل النجوم لمعاناً (قدره المطلق = +15) ، ويصل لمعانه إلى 10^4 لمعان الشمس.

مثال (1) : إذا كان كوكب الزهرة في أقصى لمعان يبلغ قدره -4 . قارن بين لمعان الزهرة و أخفت نجم يمكن أن تراه العين ، قدره +6 .

الحل:

الفرق في القدرين = +6 - (-4) = 10

اللمعان نتيجة لهذا الفرق = $(2.512)^{10} = 10^4$

من هذا يتضح أننا في حاجة إلى 10.000 نجم من القدر السادس لتلمع مثل الزهرة.

مثال (2) : ظهر في كوكبة الإوزة ، نجم جديد في أغسطس عام 1975 ينشأ هذا النوع من النجوم الجديدة نتيجة انفجار عنيف لنوع معين من النجوم 0 يتغير قدر هذه النجوم الجديدة من +15 إلى +2 خلال يومين. كم زاد لمعانه إذا ؟

الحل:

التغير في القدر $(m_2 - m_1) = 13$

نسبة اللمعان $(b1/b2) = 100^{13/5} = 158000$

إذا في يومين فقط زاد لمعان النجم 160000 مرة.

مثال (3) : يضاعف النجم المتغير من النوع RR السلياق الضوء الصادر منه دوريا. كم يتغير قدره ؟

الحل:

التغير في لمعان النجم = 2

∴ التغير في القدر $(m_2 - m_1) = 2.5 \log 2 = 0.7$

إذا يتغير قدر النجم دوريا بما قيمته سبعة أعشار القدر.

مثال (4): العيوق Capella نجم لامع وقريب من الأرض. قده الظاهري = +0.05 ومسافته = 14 بارسك.ما هو قدرة المطلق ولمعانة؟

الحل:

بتطبيق المعادلة (3-4) يكون قدره المطلق

$M = 0.05 - 5 \text{ Log } (14) = 5.68$

بمقارنة هذه القيمة بالقدر المطلق للشمس (+4.8) نجد أن العيوق ألمع من الشمس بما قيمته 5.5 قدر من العلاقة

$m_2 - m_1 = 5.5 = 2.5 \text{ Log } (b1/b2) \Rightarrow b1/b2 = 158$

وهذه يعنى أن العيوق يصدر كميات من الطاقة الضوئية 160 مرة قدر الطاقة الضوئية الشمسية.

3-2 الدليل اللوني

الاختلاف في القدر الظاهري ، هو أول ما يلاحظ من اختلاف بين النجوم بالنظر إليها ليلاً في السماء . يؤدى الفحص الدقيق للنجوم ، بالعين المجردة ، إلى ملاحظة أن للنجوم ألوانا مختلفة. على سبيل المثال ، إذا نظرت إلى مجموعة الجبار ، فإنك ستلاحظ اللون الأحمر للنجم إبط الجوزاء واللون الأزرق للنجم الرجل .

رأينا سابقاً ، أن قانون فين يربط بين درجة حرارة سطح النجم ولونه . تصل شدة الضوء إلى أقصاها في النجوم الباردة في الأطوال الموجية الكبيرة ، مما يجعلها تبدو حمراء. أما النجوم الساخنة فإن شدة الضوء فيها تصل أقصاها في الأطوال الموجية القصيرة ، ولذلك تبدو زرقاء . وتصل شدة الضوء أقصاها عند درجات الحرارة المتوسطة ، لنجوم كالشمس تشع في وضع وسط في منطقة الضوء المرئي ، وهذا يعطى الشمس لونها الذي يميل إلى الصفرة .

ويعرف الدليل اللوني Color Index بأنه الفرق بين القدرين الظاهريين أو المطلقين في المجال الأزرق والمجال المرئي، وهو مؤشر إلى لون النجم ويرمز له بالرمز b-v . أي أن

$$b\text{-}v = m_b - m_v = M_b - M_v \qquad (3\text{-}6)$$

دعنا نتصور أن نجماً لونه مائلاً للحمرة ، فيكون لمعان النجم في مدى الطول الموجي للإشعاع المرئي أكبر من لمعان النجم في الطول الموجي للإشعاع الأزرق. وهذا يعني أن قدر النجم المرئي أقل من قدر النجم الأزرق ظاهرياً كان أم مطلقاً . ويكون $m_b - m_v > 0$ ، أي أن النجم المائل للحمرة يكون دليله اللوني كمية موجبة. وإذا كان النجم لونه مائلاً للزرقة فإن لمعان النجم في مدى الطول الموجي للإشعاع المرئي أقل من لمعان النجم في الطول الموجي للإشعاع الأزرق. وهذا يعني أن قدر النجم المرئي أكبر من قدر النجم الأزرق ظاهرياً كان أم مطلقاً . ويكون $m_b - m_v < 0$ ، أي أن النجم المائل للزرقة يكون دليله اللوني كمية سالبة.

والعلاقة التي تربط بين درجة الحرارة والدليل اللوني هي

$$b\text{-}v = (7200/T) - 0.57 \qquad (3\text{-}7)$$

مثال : نجم دليله اللوني يساوي –2.5 ما هي درجة حرارته.

الحل :

$$b\text{-}v = (7200/T) - 0.57 \quad \Rightarrow T = 7200/[(b\text{-}v)+0.57] = 7200/[2.5+0.57] = 2345.3\ K$$

3-3 القدر البولومترى

في حساب القدر المطلق للنحم ، يأخذ الفلكيون في الاعتبار كميات الضوء التي لا ترى وكذلك تأثير الغلاف الجوى الأرضي. يقودنا القدر الظاهري إلى تقدير غير دقيق لطبيعة النجم هذا لو حدث وكان من النجوم التي تصدر كميات معقولة من الطاقة في النطاق غير المرئي من الضوء . على سبيل المثال ، سيبدو النجم اللامع الساخن ، والذي تبلغ درجة حرارة سطحه 35.000 درجة مطلقة ، خافتا بشدة لأعيننا ، وذلك بسبب أن معظم إصداراته الطاقية تأتى في نطاق الأشعة فوق البنفسجية. وسبب آخر ، يرجع إلى أن الغلاف الجوى الأرضي لا يسمح بمرور كمية معقولة من الإشعاع الصادر من النجوم باردة كانت أو ساخنة ، في النطاق غير المرئي من الضوء.

لعلاج هذه الصعوبة ، اقترح الفلكيون القدر البولومترى Bolometric Magnitude للنجم ، والذي هو عبارة عن القدر الظاهري للنجم مقاسا في جميع الأطوال الموجية وخارج نطاق الغلاف الجوى الأرضي. في عصرنا الحديث مكنتنا الأقمار الصناعية من حساب الأقدار البولومترية لعدد من النجوم .

تسمى القيمة التي تستنتج من هذا بالقدر المطلق البولومترى (M_{bol}) هذه الكمية أكثر بريقا من القدر المطلق المرئي (M) ، الذي يستنتج من المراصد الأرضية في النطاق المرئي من الضوء. بمقارنة المعلومات الواردة من الأقمار الصناعية ومن المراصد الأرضية ، تمكن الفلكيون من معرفة الكمية التي تضاف إلى القدر المرئي المطلق للحصول على القدر البولومترى المطلق . تسمى هذه الكمية ، التصحيح البولومترى ، ويعطى المعادلة البسيطة : $M_{bol} = M + BC$. يكون التصحيح البولومترى كبيرا للنجوم الأكثر سخونة والأكثر برودة . كمثال ، فإن التصحيح البولومترى يبلغ 3 أقدار للنجوم الساخنة فوق 20000 درجة، والنجوم الباردة أقل من 3000 درجة مطلقة. وللكثرة الغالبة من النجوم ، مثل الشمس ، والتي تصدر معظم إشعاعاتها في النطاق المرئي من الضوء ، تكون قيمة التصحيح البولومترى حول الصفر . القدر البولومترى المطلق للشمس +4.72 وقدرها المرئي المطلق هو +4.83.

يرتبط القدر البولومترى المطلق للنجم بلمعانه (L) مباشرة مع القدر البلومتري للشمس $L_{\odot}$ ولمعانها بالعلاقة الآتية

$$M_{bol} = 4.72 - 2.5\log(L/L_{\odot}) \qquad (3\text{-}8)$$

بمعرفة M_{bol} للنجم و باستخدام هذه المعادلة ، يستطيع الفلكيون ، حساب كمية الطاقة الصادرة عن سطح النجم كل ثانية وبدقة كبيرة . ويمكن حساب القدر البلومتري- M_{bol} - لأي نجم من العلاقة الآتية :

$$M_{bol} = M_{bol\odot} - 5\log(R/R_{\odot}) - 10\log(T/T_{\odot})$$

حيث $R_{\odot}$ نصف قطر الشمس و R و T هما نصف قطر ودرجة حرارة النجم على التتابع.

مثال (5): القدر الظاهري الضوئي لنجم الشعرى اليمانية = -1.46 هذا يجعله من ألمع النجوم السماء. تبلغ مسافته 2.7 بارسك ، وتبلغ درجة حرارة سطحه حوالي 10000 ° مطلقة ، وتقابل هذه تصحيحا بولومتريا قيمته -0.6 قدر. فما هو لمعان الشعرى اليمانية.

الحل

أولا : القدر البصري المطلق للشعرى اليمانية

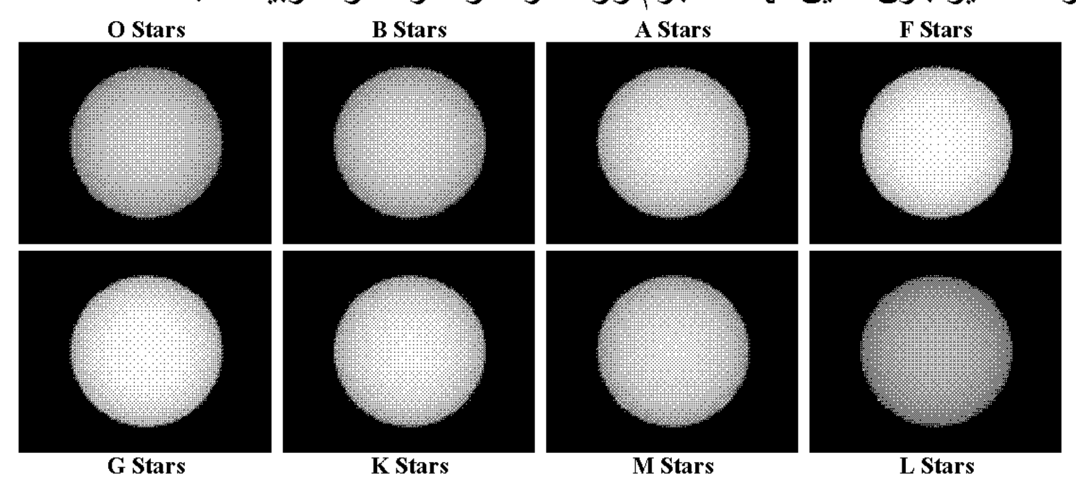
$$M = m - 5\,Lg\,(d/10)$$
$$= -1.46 - 5\,Lg\,0.27$$
$$= 1.46 - 5\,(9.4314 - 10)$$
$$= 1.4$$

إذا كان القدر المطلق للشعرى هو 1.4 والتصحيح البولومترى هو -0.6 ، فإن القدر المطلق البولومترى للشعرى

$$M_{bol} = M + BC = 1.4 - 0.6 = 0.8$$

4-3 أطياف النجوم

بعد وضع قوانين الطيف التي ذكرناها في الفصل الأول واكتشاف تحليل الطيف بواسطة المنشور وتصنيع المطياف الفلكي، تمكن وولستون في الفترة ما بين 1766 و 1822 من مشاهدة أربعة خطوط امتصاص تتخلل طيف الشمس من خلال جهاز الطيف. تلا ذلك تمكن فرنهوفر من تحديد 574 خطاً طيفياً أسوداً يتخلل طيف الشمس المستمر اللامع. وقد استبعد فرنهوفر أن تكون هذه الخطوط الطيفية ناتجة عن امتصاص الغلاف الجوي الأرضي. ولاحظ أيضاً توافقاً بين خطوط طيف الشمس وخطوط طيف بعض العناصر في المعامل الأرضية ولكنه لم يستنبط أي شيء من تلك الملاحظة. ثم في عام 1864وعام 1868 توصل كلاً من هيجنز و لوكير من أن الخطوط الطيفية للنجوم والشمس تشابه الخطوط التي تشاهد في المعامل الأرضية ، أي من نفس العناصر الأرضية. بدأ الاهتمام بتقسيم أطياف النجوم Stellar Spectra بعد رصد العديد من أطياف النجوم. وقسمت النجوم أول الأمر طبقاً لشكل طيفها إلى أربعة أنواع مختلفة طبقاً لما شاهدوه بالعين المجردة. ولكن وجد أن هذا التقسيم لا يخرج عن كونه تقسيماً طبقاً للون النجوم فقط، حيث أن كل مجموعة تتميز بلون معين فهناك نجوم زرقاء وحمراء وصفراء وبيضاء.



أحس الفلكيون بضرورة الحصول على أطياف نجوم اكثر عدداً والحصول على طيف أكثر دقة وتفصيلاً ، فاقترحوا أن يوضع جهاز المنشور أمام فتحة المنظار وبذلك حصلوا على أطياف نجوم أكثر عدداً وأكثر دقة وتفصيلاً ، فاقترحوا أن يضعوا المطياف أمام فتحة المنظار وتصوير الأطياف على ألواح فوتوغرافية. وبذلك حصلوا على أطياف مئات من النجوم. وبعد برنامج هارفرد تم تقسيم أطياف النجوم إلى حروف حيث أعطوا كل صنف حرف معين بحيث يحتوي عل درجة الحرارة المعينة وهذه الحروف بالترتيب O,B,A,F,G,K,M, N, R, S ولكي يسهل حفظها وضعها بعض الفلكيين الظرفاء في جملة هي Oh, Be A Fine Guy, Kiss Me. هناك نوع آخر يسبق هذه الأنواع الطيفية هوW. حيث تصل درجة حرارة النجم 80000 درجة مئوية وتعرف بنجوم ووالف رايت. وفي عام 1999 م تم إضافة نوعين جديدين هما L و T. وهذان النوعان تسمى النجوم البنية. وقد اقترح اسم الأقزام البنية في عام 1975م على يد الفلكي Jill C. Tarter وهذا الاسم مضلل بعض الشيء، فالقزم البني يظهر عادة أحمر اللون وليس بنيًّا، لكن اسم الأقزام الحمراء كان يطلق بالفعل على النجوم التي يصل حجمها إلى نصف حجم الشمس، وبالتالي أطلق على تلك الأجرام الأقزام البنية. والنوع الطيفي L ذات نجوم كتلتها لا تسمح بقيام التحول النووي للهيدروجين . وجاءت تسمية هذا النوع من النجوم بهذا الاسم من وجود الليثيوم في اللب. وحيث أن الليثيوم يتكسر بسرعة في النجوم العادية وبالتالي هذا الوجود يدل على عدم وجود أي تحول نووي في باطن هذه النجوم. ولون هذا النوع من النجوم أحمر غامق ولمعانها يظهر قي الموجات تحت الحمراء ، ودرجة حرارة سطحها ما بين 1500 إلى 2000 كلفن. والغاز المكون لهذه النجوم بارد جداً إلى حد تكوين المعادن الهيدراتية والمعادن القلوية بوفرة (FeH , CrH) واختفاء كلً من اكسيد التيتانيوم والفاناديوم (TiO, VO). ولنجوم ذات النوع الطيفي T تشبه النجوم T تاور وهي نجوم صغيرة جداً. وفي هذا النوع تكون الكثافة قليلة تشبه التي توجد في مادة ما بين النجوم ، ولا يتم فيها أي من العوامل الفيزيائية التي تحدث في النجوم العادية ،و كتتلتها تحت الحد المسموح به لحدوث تحول نووي في القلب. وهي تشبه الغلاف الجوي لكوكب المشتري. ويكون أقصى إشعاع لهذه النجوم في الطيف تحت الأحمر ويبلغ درجة حرارة سطحها حوالي ألف كلفن. وهذا يؤدي إلى تكوين جزيئات معقدة التركيب ويوجد فيها بوفرة الميثان CH_4 والماء H_2O والبوتاسيوم المتعادل. وبالتالي أصبحت الأنواع الطيفية هي

المخطط (هـ- ر) H-R Diagram

يعبر هذا الاختصار عن كلمة Hertz Sprung-Russel Diagram. أن أرصاد النجوم المتوافرة تغطي طيفاً واسعاً من مراحل متباينة من حياة النجوم، لذا لكي نكون صورة مسلسلة عن حياة النجوم، فلقد قام عالمان في بداية القرن العشرين – كل على حدة- هما هيرتز سبرنغ وهنري رسل برسم محورين إحداثيين لدراسة العلاقة بين القدر المطلق المرئي (أو اللمعان) للنجم أي كمية الطاقة الكلية التي يرسلها النجم في كل ثانية عبر الفضاء، وذلك على الرأسي، ووضع على المحور الأفقي صنفه الطيفي (أو درجة الحرارة لسطح النجم؛ فهي تعكس حالة سطح النجم). وعندما وضعا النجوم القريبة لكلا الخاصيتين حصلا على شكل ظهرت فيه النجوم موزعة بشكل غير متجانس عرف بمخطط هيرتز سبرنغ – راسل.

نرى أن عامل الحرارة هو مشترك بين النوع الطيفي ولمعانها المطلق للنجوم، فعلى سبيل المثال إذا أخذنا نجمين بنفس درجة الحرارة (أي نفس الطيف) لوجدنا اختلافاً في قيمة اللمعان المطلق بينهما فالنجم الأكبر حجماً لمعانه المطلق أكبر، وبالعكس لو أخذنا نجمين بنفس درجة اللمعان المطلق لوجدنا اختلافاً في درجة حرارتهما فالنجم الأقل حجماً ستكون حرارته أقل. ونستنتج أن درجة حرارة النجم تقرر لونه ولمعانه وقطره(حجمه) ويزداد قطره كلما اشتدت حرارته.

الجدول (3-1): التصنيف الطيفي للنجوم

النوع الطيفي	درجة الحرارة	لون النجم	مثال
W	أكثر من 50000	أزرق داكن	وولف رايت
O	30000	أزرق	10 الورل
B	20000	أزرق باهت	السماك الاعزل
A	10000	أبيض مزرق	الشعرى اليمانية
F	7000	أبيض	النجم القطبي
G	55000	أصفر	الشمس
K	4500	برتقالي	السماك الرامح

M	3000	أحمر	ابط الجوزاء
R	أقل من 3000	أحمر	النجم FO جسم الحية
N	أقل من 3000	أحمر	النجم U الدجاجة
S	أقل من 3000	أحمر	النجم χ الدجاجة
L	1500 إلى 2000	أحمر غامق	Teide1
T	1000	أحمر غامق	Gliese 229B

إذاً هذا المخطط هو مفتاح السر للتطو
النجمي الشكل (3-1)، فإن معظم النجوم تـ
تحت ثلاث مجموعات. تقع معظم النجوم د
الحزام الممتد من الزاوية اليسرى العلوية إ
السفلية وتعرف هذه بالتتابع الرئيسي وتتدر
إلى نجوم
باردة خافتة اللمعان (أقزام حمراء مثل بر
الهيدروجين وتحوله إلي الهليوم، وتعتبر شم
يضم أيضاً نجوم ي الجانب الأيمن العلوي تـ
باسم العملاقة الحمراء التي تنطلق من التتا
عالية مثل نجم الدبران في برج الثور، فوق
الفائقة الحمراء فهي ذي كتلة كبيرة جداً كما هو في نجم منكب الجوزاء في كوكبه الجبار بحيث نصف قطره أكبر من نصف قطر الشمس بحوالي 800 مرة. بينما في الجانب الأيسر السفلي توجد نجوم أقل سطوعاً من نجوم التتابع الرئيسي تعرف بالأقزام البيضاء(ليست كلها تتميز باللون الأبيض)؛ حيث تعتبر نجوم العملاقة الحمراء أكبر الآلاف المرات من تلك النجوم التي تعرف بالأقزام الحمراء والبيضاء.

الشكل (٣-١): الذي يصنف النجوم حسب لمعانها ودرجة حرارتها

ووفقاً لقانون ستيفان – بولتزمان الذي ينص على أن الطاقة المشعة من وحدة السطح تتناسب طردياً مع القوى الرابعة لدرجة الحرارة المطلقة ($E = \sigma T^4_{eff}$). لذا النجوم التي لها نفس درجة الحرارة سوف تشع نفس كمية الطاقة.

بقي أمر آخر هو ما الذي يحدده الموضع الذي يشغله نجم ما على الرسم H-R البياني؟.

إن بعض الإجابة هي تعتمد على كتلة النجم (مقدار المادة التي تحتوي عليها من الطاقة) وتركيبه الكيمائي أي العناصر التي يتركب منها، حيث يرجح أن تركيب النجوم التي تكونت من السحب الغازية في نفس الوقت الذي تكونت فيه الشمس، فمثلاً نجوم متفجرة (Nova) أو كالمتجدد الجبار (Super Nova) إذا كانت أقل من عشر مرات من كتلة الشمس فهي تشكل سدم كوكبية. لهذا سوف نتكلم عن الوفرة الكيميائية للمواد في وسط بين النجوم.

5-3 أنصاف أقطار النجوم

تعتبر النجوم جسم أسود مثالي ، ولهذا ، يمكن استخدام قانون ستيفان- بولتزمان ، لحساب لمعان النجم الحقيقي L ، كما في المعادلة (3-2). ومن هذه المعادلة نحصل على نصف القطر بدلالة لمعانة ودرجة حرارة سطحه :

$$R = \frac{1}{T^2}\sqrt{\frac{L}{4\Pi\sigma}}$$

مثال (7): نجم إبط الجوزاء (من كوكبة الجبار) ، وجد أن لمعانة يبلغ 10^4 مرة قدر لمعان الشمس ودرجة حرارة سطحه 3000° مطلقه . فما هو نصف قطر النجم ؟

الحل :

بالتعويض بهذه القيم وبقيمة لمعان الشمس في العلاقة السابقة ، نجد أن نصف قطر النجم 2.6×10^{11} متر أو 2 وحدة فلكية . بمعنى آخر لو أن إبط الجوزاء وضع في مركز المجموعة الشمسية ، فإنه يحتل الفراغ حتى بعد مسار كوكب المريخ . من الأفضل ، في حسابات من النوع السابق ، أن ننسب كل المتغيرات للشمس كنجم نموذجي. و بقسمة معادلة اللمعان العامة (3-2) على نفس المعادلة للشمس ، نحصل على :

$$L/L_\odot = [R/R_\odot]^2\,[T/T_\odot]^4$$

في هذه المعادلة ، تم إسقاط الثوابت ، وهذا يسهل العمليات الحسابية . وبإعادة ترتيب المتغيرات ، نحصل على

$R/R_{\odot} = (T_{\odot}/T)^2 (L/L_{\odot})^{1/2}$

مثال (8): في حالة إبط الجوزاء ، حيث $L=10^4 L_{\odot}$ ، وحيث $T=3000°$ مطلق ، وبالتعويض في المعادلة السابقة ، نحصل على :

$R/R_{\odot} = (8500/300)^2 (10^4)^{1/2} = 370$

بمعنى آخر ، يبلغ نصف قطر الجوزاء 370 مرة قدر ونصف قطر الشمس .

كما عرفنا سابقاً ، يعبر شكل هيرتزبرنج-راسل عن العلاقة بين اللمعان ودرجات الحرارة ، لهذا يمكن استخدام العلاقة السابقة بين R ، T ، L لرسم خطوط في الشكل تعبر عن أنصاف الأقطار.

يعطى طيف النجم ومقداره اللمعاني معظم المعلومات التي نحتاجها لحساب مسافة نجم من الأرض . من نوعه الطيفي ومقداره اللمعاني يمكن أن تقرأ قدره المطلق من شكل H-R . إذا علمت قدر النجم الظاهري ، فبطرح أحدهما من الآخر تحصل على المعامل المسافي (m-M) . يمكنك إذا الحصول على مسافة النجم من الجداول الفلكية ، أو من المعادلة التي تربط المتغيرات m ، M ، d . ولأن نوع الطيف ، ومقدار اللمعان ، يتم الحصول عليهما عن طريق علم الطيف ، يطلق على طريقة حساب المسافة هذه " اختلاف المنظر الطيفي" .

و كمثال نحسب مسافة قلب الأسد ، ألمع نجم في كوكبة الأسد . تم تبويب قلب الأسد ليكون B7V ، وقدره الظاهري + 1.4 . بتوقيع النجم على الشكل (3-1) نحصل على قدره المطلق = -0.6 ، وبهذا يكون معامله المسافي (m-M) = 1.4- (-0.6) = 2.0 ، ومن الجداول الفلكية ، ترى أن هذا المعامل المسافي يقابل 25 بارسك ، وهي مسافته من الأرض .

تعتبر طريقة حساب المسافة بواسطة اختلاف المنظر الطيفي غير دقيقة إلى حد ما . ذلك أننا غير متأكدين من دقة القدر المطلق ، الذي تم الحصول عليه من الشكل . ومهما يكن من شئ ، فإنها إحدى الطرق التي تمكن الفلكي من الحصول على مسافات لنجوم بعيدة .

6-3 استخدام النجوم المزدوجة في حساب كتل النجوم

لدينا الآن معلومات عن أحجام ، درجات الحرارة ، ولمعان النجوم . لكي تكتمل الصورة عن خواص النجوم ، يجب معرفة شئ عن كتلها . لا توجد طريقة مباشرة لحساب كتلة نجم واحد منعزل في السماء .

ولحسن حظ الفلكيين ، فإن نصف النجوم التي ترى ليلا ليست نجوم أحادية ، بل ، أنظمة من نجوم عديدة ، وقد يحدث أن يرتبط فيها نجم بنجم آخر أو بأكثر ، بحيث يدور إحداهما حول الآخر . والفحص الدقيق لحركات هذه النجوم ، يمكن الفلكيين من سبر غور كتلها . يطلق على نظام نجمي ، نجم مزدوج Binary Stars ، إذا حدث وكان نجمي المزدوج متقاربي الوضع جدا في السماء . كان وليم هرشل أول من قام ببحث منظم عن هذه الأنظمة . وبين الأعوام 1782 إلى 1821 تمكن من نشر ثلاثة كتالوجات تضم 800 مزدوج نجمي . فهي نهاية القرن التاسع عشر أكتشف ابنه جون هرشل 10000 مزدوج أخرى . يعتبر كثير من هذه المزدوجات النجمية مزدوج حقيقي ، مكون من نجمين تدور حول بعضها .

حين يستطيع الفلكي رؤية نجمين يدوران حول بعضهما ، فإنه يطلق عليهما مزدوج مرئي . بالمثابرة وبعد سنين عديدة من الأرصاد ، يتمكن الفلكي من رسم مساري النجمين في المزدوج المرئي.

المزدوجات التي لا يمكن رؤيتها والتي تُظهر الصور المزدوجات البعيدة كما لو كانا نجما واحدا ، يمكن اكتشافها ودراستها من الطيف. وهذا النوع من المزدوجات ، يمكن اكتشافه حين تبدى خطوط الطيف شكلا غير عادى . من هذه الأمثلة ، ما يمكن أن يظهره الطيف من احتوائه على خطوط طيف هيدروجين قوية (تميز نوع النجوم A) وخطوط امتصاص قوية لأكسيد التيتانيوم التي تميز النوع M من النجوم . ولأنه لا يوجد نجم واحد يجمع بين هاتين الخاصيتين إذا يمكن استنتاج أن هذا النجم مزدوج . يسمى المزدوج الذي يكتشف عن طريق طيفه بالمزدوج الطيفي .

تمكننا ظاهرة إزاحة دوبلر من اكتشاف الطبيعة الازدواجية لنجمين ظهرا كنجم واحد ، شريطة ألا يقل الفارق في السرعة المدارية بينهما عن بضعة كيلو مترات في الثانية .

$$\frac{\lambda - \lambda_o}{\lambda_o} = \frac{v_r}{c}$$

حيث v_r هي السرعة القطرية على امتداد خط الرؤية . من هذه المعادلة نستطيع تحويل قياسات الأطوال الموجية إلى معلومات عن حركة النجوم . من المهم أن نوضح أن ظاهرة دوبلر تنطبق فقط ، على الحركة على طول خط الرؤية لا تؤثر الحركة العمودية على خط الرؤية على الأطوال الموجية .

7-3 توزيع النجوم وتعدادها

تتوزع النجوم في مجرتنا والقريبة من شمسنا توزيعاً عشوائياً، وكلما ابتعدنا أكثر من الشمس وجدنا أن عدد النجوم يتزايد متناسباً مع مكعب المسافة بينه وبين الشمس، مما يدل على أن النجوم تتوزع توزيعاً منتظماً، كما أنه كلما بعدت النجوم أكثر عن الشمس وجدنا أن عدد النجوم يقل في اتجاهات معينة، وهذا يدل على أن النظام الشمسي الذي تنتمي إليه الشمس يتخذ شكلاً معيناً في الفضاء ، من دراسات العالم الفلكي هرشل واتي واصلها العالم كيبتان اقترح النظام النجمي الذي تنتمي إليه الشمس، والذي أطلق عليه اسم عالم كيبتان، حيث النظام النجمي يتخذ شكل قرصاً كبيراً منبعجاً من وسطه وتقع الشمس في مركزه، لكن هذا المقترح للنظام النجمي في مجرتنا لم يدم طويلاً حيث وُجد من الرصد أن توزيع النجوم -كلما بعدنا عن الشمس- ليس توزيعاً يتوآم مع مركزية الشمس في مقترح كيبتان للنظام النجمي للمجرة، بل وجد أن توزيع الحشود الكريه يدل على عدم مركزية الشمس في النظام النجمي لمجرتنا.

أغلب المجموعات النجمية خافتة مع القطر الزاوي الظاهر لها وهذا يعني أن هذه المجموعات النجمية الخافتة بعيدة جداً وفي نفس الوقت Linear size كبير جداً.هذا التعارض بين لمعان هذه المجموعات النجمية وقطرها الزاوي يختفي عندما علمنا أن هناك تراب كوني يقع بين النجوم تحت مستوى المجرة .

يتشتت ضوء النجوم القادم بسبب هذا التراب وهذا يؤدي إلى ظاهرة تسمى بـ Interstellar extinction والنجوم تشاهد عند خطوط ارتفاع مجرية عالية عمودية على مستوى المجرة ، فعلى بعد حوالي 500 بارسك لا تظهر ظاهرة الإعتام ما بين النجوم بشكل كبير لكن بالقرب من مستوى المجرة ظاهرة الإعتام تظهر بشكل كبير وتكون هناك علاقة طرديه مع القدر الظاهري و الإعتام. ولهذا فإن نجم على بعد واحد كم بارسك من مستوى المجرة يكون له دالة لمعان $m - M = 11$ mag بالرغم انه غير $m - M = 10$ mag وهذا يعني أن النجوم تكون ابعد بمقدار 1.6 كم بارسك .

خط مركز المجرة (L) :

هو الدائرة العظمى مع خط الطول المجري وهو يقاس بالدرجات من الصفر إلى 360 درجة من الغرب إلى الشرق باتجاه مركز المجرة في كوكبة الأسد .

خط عرض المجرة (b) :

هو المسافة الزاوية من الصفر إلى +90 درجة شمالاً أو جنوباً من خط استواء المجرة ، القطب الشمالي للمجرة $b = 0,90$ و $L = 180$ والقطب الجنوبي $b = -90$.

نفترض أولاً أن النجوم متوزعه بصورة نظامية وعلى هذا الأساس يكون في الاتجاه الذي نرى فيه النجوم أكثر تكون مجرتنا ممتدة أكثر . اعتبر أن الزاوية المجسمة لدينا هي (w)والمساحة لتي تشكلها هي (A) فإن $A=wr^2$

وكذلك الحجم يعطى بـ

$$dv=Adr \;=\; (wr^2)dr \;=dw\, r^2dr \;+2wrdrdr$$

$$dv=r^2dwdr \qquad (3\text{-}9)$$

لو اعتبرنا أن عدد النجوم في وحدة الحجوم ((الكثافة العددية)) $n(r)$على بعد r، إذن يكون عدد النجوم الكلي في هذا الحجم الذي ما بين $r, r+dr$:

$$N(r) = n(r)dv \qquad (3\text{-}10)$$

بتعويض (3-9) في (3-10) نحصل على

$$N(r) = n(r)r^2drdw \qquad (3\text{-}11)$$

اعتبر الآن أن كل النجوم لها لمعان مطلق واحد (M) واعتبر أيضا أن عدد النجوم في وحدة الحجم $n(r)$ ثابت ولا يتغير مع r . وبفرض أن $n(r) = n$

وإذا كان $r(m)$ هو المسافة التي عندها النجوم ذات قدر ظاهري (m) يكون عدد النجوم في هذا النجم:

$$N(m) = 4/3□r^3(m)n$$

$$N(m) = r^3(m)\ constant \qquad (I)$$

حيث أن المقدار $4/3□n$ كمية ثابتة.

وإذا كانت علاقة المسافة باللمعان تعطى بالعلاقة التالية

$$Log(r) = (m-M+5)/5 \;= m/5+((-M+5)/5) = m/5 + C_1$$

حيث

$$C_1 = (-M+5)/5$$

$$\therefore Log(r) = 0,2m + C_1 \qquad (II)$$

بأخذ لوغاريتم الطرفين بالنسبة إلى I فتصبح كالتالي :

$\log N(m) = 3\log r(m) + constant$ (.III)

بالتعويض من I في III :

$\log N(m) = 3(0,2m) + C = 0,6m + C$.(.IV)

حيث C ثابت والمعادلة IV هي تعداد النجوم ذات القدر m .

مثال:-

لو أخذنا m =1 في الحالة الأولى و m =2 في الحالة الثانية فإنه بالتعويض في المعادلة III يتضح الآتي:

$m = 1$

$\log N(m) = 0.6(1) + C = 0.6 + C$

$N(m) = 10^{0,6} * C$

$m = 2$

$\log N(m) = 0,6(2) + C \rightarrow N(m) = 10^{1,2} * C$

الفرق بين عدد النجوم التي تشغل حجماً معيناً ذات لمعان m = 1 وبين التي تشغل حجماً معيناً ذات لمعان m = 2

$N(m2) - N(m1) = 10^{0,6}$

وهذا يعني إن عدد النجوم يكون أكثر بـ $10^{0,6} = 3,98$ مرة ما بين قدر ظاهري m ، m+1 .

إذا فرضنا أن uniform density بالطبع هذه صورة مبسطة لتعداد النجوم وهناك عاملان في هذه النتيجة : التوزيع غير المنتظم 2- الاعتام ما بين النجوم

8-3 مركبات السرعة للحركات النجمية

تنشأ الحركات النجمية من السرعات غير الخطية للنجوم خلال الفضاء،فهذه السرعات كميات متجهة تحلل إلى مركبتين متعامدتين: السرعة القطرية التي على خط طول النظر والسرعة المماسية في المستوى للسماء.وهي ترصد بالنسبة إلى الأرض والتي تشير إلى المركز لكتلة النظام الشمسي.

أ- السرعة القطرية

السرعة القطرية (Radial velocity) υ_r للنجم هي سرعة اقترابه وتراجعه (ابتعاده) ويمكن الحصول عليها من تغير دوبلر للخطوط الطيفية النجمية. وتتيح تغير دوبلر المقاسه ($\Delta\lambda=\lambda-\lambda_o$) لنا أن نستدل السرعة القطرية للنجم من الصيغة لدوبلر

$$\upsilon_r=(\Delta\lambda/\lambda_o)c \quad\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(3\text{-}12)$$

حيث c سرعة الضوء. λ الطول الموجي المقاس، λ_o الطول الموجي السكوني.

فعندما $\lambda>\lambda_o$ فالطيف هو red shifted و υ_r هي السرعة القطرية لتراجع النجم. و$\lambda<\lambda_o$ فالطيف هو blue shifted والنجم يقترب منا . وهذه الحركات ترجع إلى الشمس ومنه فالسرعة المدارية للأرض على طول الخط للنظر إلى النجم تساوي 30كم/ث (السرعة الخطية). يمكن تحديد السرعة القطرية لأي نجم وذلك بالحصول على الطيف للنجم ويمكن الآن قياس السرعات القطرية النجمية بالدقة بحوالي 10كم/ث .

ب- الحركة الذاتية

الحركة الذاتية proper motion هي الحركة للنجم في المستوى للكرة السماوية ويرمز بـ μ (بالثانية قوسيه لكل سنة). نظراً للسرعة المتعامدة المعطاة على خط النظر ستكون الحركة الذاتية على مقربة اكبر للنجم نحونا . فالنجوم البعيدة جداً لا يمكن قياس حركتها الذاتية - أي لا تظهر حركتها الذاتية - ولكن ربما تستخدم كصلة أو خلفية للنجوم. ويمكن من الحركة الذاتية معرفة التركيب لمجرتنا.

ج- السرعة الممسية

υ_t هي السرعة الخطية في الاتجاه المتعامد على خط النظر ومنها يمكن إيجاد الحركة الذاتية. لكي يتحول القياس الزاوي للحركة الذاتية إلى السرعة الخطية المستعرضة - السرعة المماسية Tangential velocity - (كم/ث) لابد من معرفة المسافة d نحو النجم

$$\upsilon_t = d\sin\mu \cong \mu d \ldots\ldots\ldots\ldots(313)$$

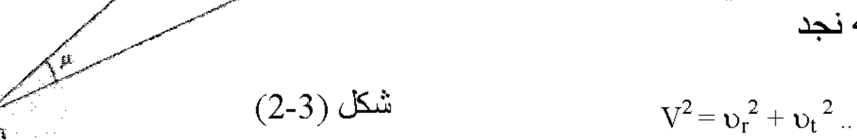
نتبع الجزء الأخير من المعادلة 2 لان μ صغيرة جداً (أقل من 5×10^{-5} راديان/سنه). نظراً ل d معطاة بالبارسك و μ بالثانية قوسيه لكل سنة. تعطى υ_t من المعادلة 2 بالبارسك لكل سنة عندما تكون μ بالرديان لكل سنة ولكن عندما μ بالثانية قوسيه لكل سنة فإن υ_t تكون بالوحدات الفلكية لكل سنة ، كذلك تحويل الوحدة الفلكية إلى كم و سنه إلى ثانية . نجد أن

$$\upsilon_t = 4.74d\mu'' = 4.74(\mu''/\pi'')\ \text{Km/s} \ldots\ldots\ldots\ldots(.3\text{-}14)$$

حيث المسافة d معطاة بالبارسك واختلاف المنظر π'' بالثانية قوسيه والحركة الذاتية μ''.

د- الحركة الفضائية

الحركة الفضائية Space Motion غير الخطية V للنجم بالنسبة إلى الشمس تتركب إلى مركبتين متعامدتين : (1) السرعة القطرية (السرعة الخطية) التي تقدر بـ υ_r ، و (2) السرعة المماسية التي تقدر بـ υ_t(السرعة الخطية) كما في الشكل (3-2) . من النظرية الفيثاغورينيه نجد



شكل (3-2)

$$V^2 = \upsilon_r^2 + \upsilon_t^2 \ldots$$

كذلك الوحدات في المعادلة 4 بنفس الوحدات لذلك نعرف المسافات نحو النجوم من المعادلة 3. الزاوية التي تصنعها الحركة الفضائية مع خط النظر هي θ وتوجد من $\tan\theta = \upsilon_t/\upsilon_r$.

ولذلك تجمع المركبتين في المعادلة 4 لإيجاد السرعة الكلية والاتجاه للنجم في الفضاء (نسبياً للشمس) . لأجل النجوم المجاورة للشمس فإن مقدار متوسطات سرعتها الفضائية هي 25كم/ث .

3-9 حركة الحشود النجمية

إن الحشد هو مجموعة من النجوم مقيدة بقوة انجذابيه تتجوّل ما بين المجرة . إذن كل أعضاء الحشد تُظهر نفس الحركة المميزة (pecular motion) نسبياً إلى أل LSR لأن الحركات النجمية ليست عشوائية . تتيح الأخطاء الشهودية العشوائية لنا عدد قليل من النجوم ليس جزء من الحشد . فمن المعادلة 3 يمكن معرفة النجوم المرتبطة بالحشد وعلى بعد500 بارسك .
نعتبر الحشد الصغير أو البعيد يقع مقابل الزاوية المجسمة الصغيرة في السماء سرعته القطرية υ_r وحركته الذاتية الزاوية μ'' بالنسبة إلى LSR وذلك بدراسة نجم منفرد من المجموعة (وتصحيح للحركة الشمسية المعكوسة) . نأخذ متوسطات لعدة نجوم لتفادي الخطأ أنها ليست جزء من الحشد . الاتجاه لسرعة الفضاء للحشد من المعادلة 3 . الموقع المستحسن عندما يكون الحشد المجاور يقع مقابل الزاوية المجسمة الكبيرة في السماء . لأن كل أعضاء الحشد تتحرك في نفس الاتجاه الفضائي ، تبدو حركتهم الذاتية تتقارب نحو (أو تتباعد عن) النقطة المنفردة على الكرة السماوية تسمى النقطة المتقاربة (the convergent point) . هذه الظاهرة الطبيعية تظهر من آثار منظوريه التي تبدو بسبب حركات متوازية للنجوم تشع من النقطة المنفردة في السماء . في ما مضى نعلم السرعة القطرية لحركة الحشد نحدده لآجل العضو النجمي المنفرد . أيضاً نعلم الآن الاتجاه للحركة الفضائية للحشد .
عندما نصل إلى الحركات الذاتية لعضة النجوم في السماء تتقاطع عند النقطة المتقاربة المسافة الزاوية θ من النقطة المتقاربة إلى العضو النجمي هي نفسها الزاوية بين خط النظر لذلك النجم ومتجه السرعة الفضائية للنجم V .

$$V = \upsilon_r/\cos\theta \qquad (3\text{-}15)$$

لكن نعلم أن $\upsilon_t = V\sin\theta$ وكذلك باستخدام المعادلات (3-14) و (3-15) تعطينا مسافة الحشد ومنه نستنتج زاوية اختلاف المنظر:

$$\pi'' = 4.74\mu''/\upsilon_r \tan\theta \qquad (3\text{-}16)$$

نلاحظ لقد عرفت مسافة الحشد وكذلك للنجوم الأخرى المستقلة . فمثلاً : السرعات القطرية لحوالي 40 نجم في كوكبة القلائص (Hyades) المرصودة نحصل على السرعة

فالمسافات التي أقل من 100 بارسك مبنية على أساس اختلاف المنظر المثلثي . عند الفلكيين المقياس المدرج ممتد إلى الحشد لـ خلية النحل [Praesepe (Beehive)] النجمية في السرطان عند 159 بارسك وإلى الحشد المزدوج (h و Perseix) في فرساوس (Perseus) عند 2330بارسك بنسبة خطأ لايتجاوز 10 % في تلك المسافات .

مركز السكون الحر- للقياس المحلي للسكون

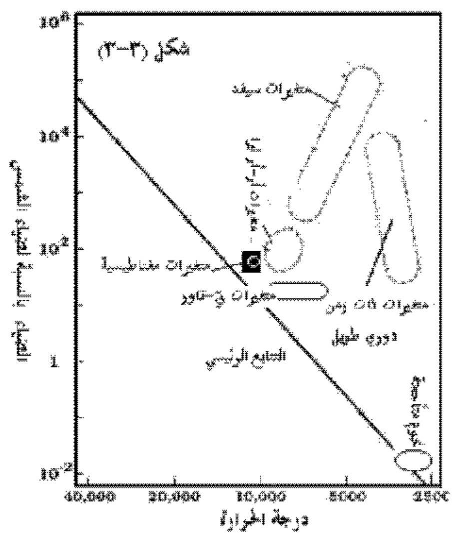
يوجد لمجرتنا نظامين :

الأول: نظام التمركز عند النواة لمجرتنا مستواه المستوى المجري ومحوره محور الدوران المجري.

الثاني: نظام القياس المحلي للسكون Local Standard of Rest (LSR) : هو المتمركز لاحظيا عند الشمس التي تتحرك في مدار دائري حول المركز المجري عند السرعة الدائرية المناسبة بموقعها في المجرة . يمكن تعريف أل LSR بالديناميكية أل LSR لذلك النجوم المجاورة للشمس في مدارات مجرية هي أساساً عند السكون . فأي انحراف من الحركة الدائرية بالنجوم المجاورة للشمس ستبدو كحركات نجمية غريبة (متميزة) بالنسبة إلى الديناميكية ل LSR . مدار الشمس المجري ليس دائري . لذلك الحركة بالنسبة إلى أل LSR بـ 19,5كم/ث تظهر نحو كوكبة هرقل (الجاثي) [l = 56° , b = 23°] . تتحرك الشمس على الكرة السماوية نحو القمة الشمسية (the solar apex) وبعيداً عن عكس القمة الشمسية. أول من أثبت هذه الحركة الشمسية في عام 1783م هو وليم هرشل باستخدام الطرائق الإحصائية . تظهر النجوم المجاورة للشمس حركات غريبة (peculiar motions) بالنسبة إلى أل LSR أي تحتشد كنحلات ببطء . إذا كانت الشمس عند السكون في أل LSR فمتوسط هذه السرعات المميزة تساوي صفر بالنسبة إلى الشمس . إذاً تتحرك الشمس بالنسبة إلى LSR ومع ذلك كل

النجوم على الدائرة العظمى 90^{o} عن كلا أل apex و antapex - عند المتوسط - سوف تظهر الحركات الذاتية الأكبر عند أل antapex . إذن متوسطات الحركة الذاتية (خارجا بحوالي 500 بارسك) تكشف المواقع أل apex و أل antapex نحو السرعة للحركة الشمسية بمتوسط السرعات القطرية للنجوم قرب أل apex والنجوم قرب أل antapex ، أي المتوسط للسرعة القطرية من الاقتراب الأكبر عند أل apex والتراجع الأكبر نحو أل antapex (طريقة أخرى لتعين أل apex و أل antapex) .

يلاحظ أن المعدل للحركة الذاتية تغيب عند كلا أل apex و أل antapex لأن عينة النجوم المأخوذة لأجل السرعة القطرية بعيدة أكثر بكثير من هذه العينة المأخوذة لأجل الحركة الذاتية فالموقع المختلف ل apex ينتج من كل عينة بالخصوص ، لموقعين متماثلة تقريباً .



3-10 النجوم المتغيرة

برصد النجوم شوهد ما يقرب من 26 ألف نجم يتغير لمعانهما مع الزمن. وتتم دراسة النجوم المتغيرة من خلال هذه الطرق : **أولاً** : الدراسة الفوتومترية التي تعطى علاقة بين أقدار النجوم مع الأطوال الموجية المختلفة وتغيرها

مع الزمن ، فيما يعرف بمنحنى الضوء light curve. ثانياً عن
طريق الدراسات الطيفية التي تعطي العلاقة بين الطور
والتقسيم الطيفي. ثالثاً دراسات السرعة القطرية حيث أنه من
الدراسات الطيفية وتغيرها مع الزمن يمكن قياس سرعة
النجم القطرية وتغير هذه السرعة مع الزمن وبذلك نحصل على
منحنى السرعة.

النجوم المتغيرة : هي نجوم يتغير لمعنها الحقيقي نتيجة أحداث فيزيائية ذاتية تحدث للنجم وهي تنقسم إلى ثلاثة أنواع : **النوع الأول** نجوم نابضة pulsating ذات غلاف نجمي يتمدد وينكمش بصورة دورية مما يجعل لمعانها يتغير بشكل دوري. **النوع الثاني** نجوم متغيرة بصورة فجائية نتيجة ثورانها eruptive أو انفجارها explosive ، وهذه يكون تغير لمعانها درماتيكي. **والنوع الثالث** نجوم يتغير لمعانها نتيجة لتغير بعض الخواص الفيزيائية مثل تغير الطيف وتغير المغناطيسية وعملية التأجج التي تحدث في مناطق صغيرة على سطح النجم مما يؤدي إلى زيادة مفاجئة في اللمعان الحقيقي لعدة ثواني.

والنجوم النابضة ، هي نجوم تنبض لأنها ليست في حالة اتزان هيدروستاتيكي بين الجاذبية التي تؤثر على الكتلة الخارجية للنجم والضغط الناتج من مركز النجم. ويتمدد النجم نتيجة لزيادة ضغط الغاز وهذا يؤدي إلى أن كثافة المادة المكونة للنجم تقل حتى تصل إلى نقطة اتزان بين الجاذبية إلى الداخل والضغط إلى الخارج. ونتيجة لزخم التمدد فإن الضغط يقل عند نقطة الاتزان وتزداد الجاذبية مما يؤدي إلى انكماش سطح النجم. وبنفس الطريقة زخم المادة المنكمشة يحدث انكماش إلى ما بعد نقطة الاتزان بين الضغط والجاذبية ، مما يؤدي إلى أن الضغط يزداد مرةً أخرى ، وبالتالي يتمدد سطح النجم. وتتكرر دورة الانكماش والتمدد مرةً أخرى. وأثناء عملية النبض يحدث فقد في طاقة النجم مما يعني أنه في أخر الأمر يحدث اضمحلال لنبض النجم.

في حالة النجوم النابضة ذات زمن دوري منتظم يمكن تطبيق قانون كبلر في هذه الحالة

$$P^2/R^3 = 4\pi/GM \qquad (3\text{-} 17)$$

حيث P الزمن الدوري للنبض و R نصف قطر النجم و M كتلة النجم و G ثابت الجذب العام. من المعادلة السابق نجد أن مربع زمن النبض يتناسب عكسياً مع الكتلة وبالتالي مع الكثافة.

والنجوم النابضة تختلف فيما بينها في مدة تغير اللمعان وفي طيفها وفي نورانيتها وفي شكل منحنى الضوء وفي موقعها في المجرة وفي تركبها الكيميائي. وموقع هذه النجوم يتضح من الشكل (3-3) ، وهي :

أولاً : النجوم القيفاوية

وسميت بهذا نسبة إلى النجم δ Cephei وهي نجوم عملاقة يتغير لمعانها بمقدار لا يزيد عن قدر واحد ومدة هذا التغير تتراوح بين 1 إلى 50 يوم. وتنقسم النجوم القيفاوية إلى ثلاث مجموعات :

1- نجوم قيفاوية من النوع الأول وهي شديدة الضياء ومدة تغير لمعانها يتراوح بين 2-40 يوم وتقع في قرص المجرة. ونجوم هذا النوع تقع في نطاق التقسيم الطيفي F6 إلى K2 والعلاقة بين القدر المطلق المرئي M_v ومدة التغير تعطى بـ.

$M_v = -1.67 - 2.54 \log($ زمن التغير $)$ (3-18)

2- ***نجوم قيفاوية من النوع الثاني*** وهي أقل ضياءً من الأول ومدة تغير لمعانها يتراوح بين 10-30 يوم وتقع في هالة المجرة والحشود الكروية. ونجوم هذا النوع تقع في نطاق التقسيم الطيفي F2 إلى G6 . والعلاقة بين القدر المطلق المرئي M_v ومدة التغير تعطى بـ

$M_v = -0.27 - 2.54 \log($ زمن التغير $)$ (3-19)

وتستخدم النجوم القيفاوية في قياس الأبعاد الكونية

3-نجوم و أر- أر ليرا RR Lyrae وهي نجوم ضياؤها الحقيقي يكاد يكون ثابت ويبلغ مقدار التغير حوالي 0.5 ومدة تغير لمعانها يقدر بالساعات وتقع حول هالة المجرة والحشود الكروية. ونجوم هذا النوع تقع في نطاق التقسيم الطيفي A2 إلى F6 . ولمعان هذه النجوم يبلغ 100 مرة لمعان الشمس. ويعرف حتى الأن حوالي 5000 نجم.

ثانياً : نجوم الميرا الأعجوبة

وهي نجوم معدل تغير لمعانها طويل جداً يتراوح من 100 إلى 700 يوم. وهو غير دوري بسبب أنها دخلت في مرحلة احتراق الهليوم. وهي نجوم عملاقة وفوق العملاقة وتقع في التقسيم الطيفي M و K ، ولمعانها أكبر بحوالي 100 مرة لمعان الشمس ، ويبلغ متوسط درجة حرارة سطحها 2000 كلفن ، ومعظم إشعاعها يكون في منطقة تحت الأحمر ، وقد تم رصد أطياف الجزيئات وحبات الغبار في سطحها.

أما النجوم المتغير ة غير النابضة فهي :

أولاً: النجوم الغير عادية أر –تي –تاور

وهذه النجوم تقع قبل التتابع الرئيسي ، وفي هذه المرحلة من التطور تكون كتلتها صغيرة و وتبلغ من 0.2 إلى 2 كتلة الشمس ولها مجال مغناطيسي نشط نتيجة لدوران في هذه المرحلة تكون عملية النقل الحراري نشطة في كل مناطق النجم وتوجد أيضا نشاط مغناطيسي منتشر بسطح النجم. بضْع نجم يكون لها مناطقُ نشيطةُ مُظلمةُ كبيرةُ في منطقة الفوتوسفير ناتجة مِنْ التحوير التدويري لضوئها. وطيف هذه النجوم يحتوي على خطوط بالمر للهيدروجين والكالسيوم المتأين وبعض المعادن مما يدل على نشاط في منطقة الكروموسفير. ونجوم هذا النوع تقع في التقسيم الطيفي من F إلى M وتقع قريبة من مادة ما بين النجوم المظلمة. وهذه النجوم تقع في شكل H-R فوق ويمين التتابع الرئيسي.

ثانياً النجوم المتوهّجة flare stars

هي نجوم تتابع رئيسي ولكن لها نشاط توهجي مثل الشمس. وسميت بهذا الاسم لأن الانفجارات الشمسية هي السمة النشيطة والأكثر دهشةً في الأنواع المختلفة للنشاط الشمسي ، ويتم عن طريقة خروج كميات كبيرة من الطاقة من سطح النجم أو الشمس. وبعض النجوم من التقسيم الطيفي G لها نفس الخصية. على أية حال، القزم من النوع الطيفي M يكون إشعاعه أقل كثيراً من الشمس، عندما يندلع الانفجار الشمسي الكبير من سطحه تخرج طاقة تؤدّي إلى ضعفين زيادة في السطوع.

المتغيرات المغناطيسية magnetic variables

هي نجوم لها خصائص نجوم التقسيم الطيفي A ولكن خطوطها الطيفية تظهر فيها بعض حالات الشذوذ.

بعض هذه النجوم يتعرض طيفها إلى متغيرات مما يؤدي إلى تغير كثافة الفيض المغناطيسي لبعض الخطوط بشكل دوري تقريباً. والعديد من هذه الخطوط الطيف الغريبة وخطوط الطيف لعناصر المعدنية يكون لها حقول مغناطيسية قوية ومتكاملة يتراوح شدتها من 01إلى 0.1 تسلا. واحد التفسير المحتملة للتغيّر المغناطيسي هو أنّ الأقطاب المغناطيسيةِ تُميّلُ على قطب دوران النجم حول محورة مثل البلسار .

الفصل الرابع

تطـور النـجـوم

4-1 حياة النجم على التتابع الرئيسي

إن استمرار النجم على التتابع الرئيسي هو عدم تغير كتلته بفعل الاندماج النووي للهيدروجين في لب للنجم متحولاً إلى هليوم. إلا أن هناك تغيرات طفيفة تظهر على النجم عندما تتوقف في مركز النجم تيارات الحمل الحراري عن إصدار الطاقة من قرب سطحه. و النجم الأولي أو الجنين (Embryo) يبدأ بانقباض بطئ مرة أخرى (الأولى عندما كان جزء من السحابة) تحت الانكماش التجاذبي وخلال تكدس الهليوم تزداد كثافة النجم ودرجة الحرارة المركزية تصبح كافية لإشعال التفاعلات النووية مما يؤدي إلى زيادة طاقته النووية وهذه هي حالات التشكل الكامل قبل أن يصل النجم إلى التتابع الرئيسي وتخرج منه الطاقة المشعة وعندئذ لا يبقى النجم عند العمر البدائي للتتابع الرئيسي(ZAMS) بل يتحرك لموضع آخر.

إن النجم على التتابع الرئيسي يكون في حالة مستقرة (اتزان)، في هذه الحالة تكون بنيته محددة بالكتلة الكلية وتوزيع العناصر الكيميائية بداخل النجم توزيعاً متجانساً وهذا ما يعرف بنظرية راسل - فوقت. وهذه الحالة تسمى حالة الاتزان الحراري والهيدروستاتيكي.

إن الذي يحدد استمرار النجم على التتابع الرئيسي ثلاثة عوامل رئيسية هي: درجة الحرارة والضغط والتركيب الكيميائي لكتلة. ونعرف ذلك عن طريق شدة الإشعاع الذي يبعثه النجم على شكل أطوال موجية؛ أي أن كمية الطاقة المنبعثة من النجم (النورانية أو الضياء) هي

$$\text{Log } L \approx 7.5 \log T_e + 5.44 \qquad (4\text{-}1)$$

ونصف القطر نجده من قانون ستيفان الذي يساوي $L = 4\pi R^2 \sigma T_e^4$. ولذلك نجد اللمعان

$$\log L = 2\log R + 4\log T_e - 3.15 \qquad (4\text{-}2)$$

وبحذف T_e من كلا المعادلتين (4-1) و (4-2) نجد أن

$$\log L = 4.29 \log R - 13.0 \qquad (4\text{-}3)$$

و من ذلك نحصل على العلاقات التالية :

التدفق الحراري عند السطح

$$H_s = L / 4\pi R^2 \qquad (4\text{-}4a)$$

الكثافة المتوسطة

$$\bar{\rho} = 3M / 4\pi R^3 \qquad (4\text{-}4b)$$

معدل الطاقة العامة بوحدة الكتلة

$$\varepsilon = L / M \qquad (4\text{-}4c)$$

ويلاحظ أن H_s ، R ، M تزداد عند اللمعان العالي بينما تتناقص $\bar{\rho}$ ولذلك نصف القطر متوقف على الكتلة :

$$\left.\begin{array}{lll} R \propto M^{0.9} & \text{for} & M \leq 7.8\times 10^{33}\ g \\ R \propto M^{0.43} & \text{for} & M \leq 7.8\times 10^{33}\ g \end{array}\right\} \qquad (4\text{-}4d)$$

4-1 – 1 القوانين الفيزيائية داخل نجوم التتابع الرئيسي

بفرض أن سحابة الغاز الساخن المكونة للنجم متماثلة كروياً في حالة اتزان هيدروستاتيكي مع انتقال الطاقة بواسطة الإشعاع لا بالمجال المغناطيسي أو الدوران.فإن القوانين الفيزيائية لفهم ما يحصل بداخل النجم كالتالي:

1- الاتزان (Equilibrium) :

نفترض أن سحابة الغاز ليس لها ضغط داخلي وبالتالي من قانون الجاذبية وقانون نيوتن الثالث للحركة سوف تنهار عند معدل السقوط الحر في زمن قدره t والذي يساوي تقريباً $(6\pi\rho G)^{-0.5}$. ولكي يتزن الضغط الداخلي مع القوة لجذب الجاذبية الذاتية لابد أن :

$$P \;□\; GM^2 / R^4 \qquad (4\text{-}5)$$

وحيث أن الغاز مثالي فإن الضغط يساوي :

$$P = (□/\mu)\,\rho\, T \qquad (4\text{-}6)$$

وحيث أن μ هي الوزن جزيئي للغاز و □ ثابت الغاز المثالي فإن الكثافة تعطى بـ

$$\rho \;□\; M/ R^3 \qquad (4\text{-}7)$$

ومن المعادلة (4-6) و(4-7) نحصل على درجة الحرارة T و بقسمتهما على (4-5) نحصل على

$$T \;□\; (\mu /□)\,(GM /R)$$

وحيث أن ثابت التناسب معتمد على توزيع الكتلة القطرية فإن

$$T \;□\; \mu\, GM /R \qquad (4\text{-}8)$$

من المعادلة (4-4d) و المعادلة (4-8) نجد أنه ، إذا كانت نجوم التتابع الرئيسي متماثلة البنية، أي لها نفس النسبة لتوزيع الكتلة، فإن درجة الحرارة المركزية تعتمد على كتلتها كالتالي:

$$\left.\begin{array}{lll} T_c \;□\; \mu M^{0.1} & \text{for} & M \le 7.8\times 10^{33}\ g \\ T_c \;□\; \mu M^{0.57} & \text{for} & M \le 7.8\times 10^{33}\ g \end{array}\right\} \qquad (4\text{-}9)$$

وعليه تكون T_c ثابتة تقريباً لنجوم التتابع الرئيسي بكتل $M \le M□$ وتزداد ببطئ الكتلة لنجوم أكثر ضخامة.

2- تدفق الطاقة Energy Flow:

إذا كانت X، Y، Z تمثل كتلة كل من الهيدروجين والهليوم والعناصر الثقيلة على التوالي بوحدة الكتلة للغاز وإن m وحدة الكتلة الذرية وN العدد الذري وA الوزن الذري فإن عدد الإلكترونات يوصف بـ

$$n_e = (1.\ \rho X/m) + (2.\ \rho X/4m) + (N.\ \rho Z/Am)$$

وبما أن $N/A \approx 1/2$ وفي غالبية النجوم تكون $Z << X$ ، أي أن $Y \approx 1-X$ و بذلك نحصل على

$$n_e = \rho/2m\ (1+X) \qquad (4\text{-}10)$$

وسرعة الإلكترون

$$\upsilon_e = (3KT/m)^{1/2} \qquad (4\text{-}11)$$

وبما إن العتامة لوحدة الكتل κ تتناسب مع معدل الامتصاص للطاقة مقسوماً على تدفق الطاقة (بواسطة انتقال الإشعاع) الذي يتناسب مع T^4 . إذاً يمكن كتابة

$$\kappa=\kappa_0\ \rho(1+X)\ (1-X-Y)\ T^{-3.5} \qquad (4\text{-}12)$$

هذا ما يعرف بقانون كرامر للعتامة (Kramer's Opacity Law) وهو دالة في الكثافة ودرجة الحرارة و التركيب الكيميائي ويحدد ثابت التناسب κ_0 باستخدام التوزيع لسرعات الإلكترون.

و مقارنة بقانون أوم $I=V/R$ ، يمكن حساب التدفق للطاقة المشعة لوحدة المساحة على أنها النسبة بين معدل تغير الضغط الإشعاعي والعتامة لوحدة الحجوم. أي أن

$$H \propto [d\{(1/3)aT^4\}]/dr/\ \kappa\rho \ \propto T^3\ (dT/dr)/\ \kappa\rho \qquad (4\text{-}13)$$

حيث T درجة الحرارة و ρ الكثافة و a الثابت الإشعاعي. فإذا كان الانتقال لتدفق الطاقة خارج من خلال النجم بالإشعاع، وأن $T \propto T_c$ و $dT/dr \propto T_c/R$ ومن المعادلة (4-8) فإن نورانية النجم تعطى بـ

$$L \propto \mu^4 M^3/\ \kappa \qquad (4\text{-}14)$$

وبهذا استنتج كرامر قانون القوى للتركيب الشمسي لأجل العتامة

$$\kappa \propto \rho T^{-3.5} \qquad (4\text{-}15)$$

وباستخدام المعادلة (4-8) و المعادلة (4-7) نحصل على

$$\kappa \propto \mu^{-3.5} M^{5.5} R^{0.5} \qquad (4\text{-}16)$$

ومن المعادلة (4-15) و والمعادلة (4-16) تصبح النورانية

$$L \propto \mu^{7.5}M^{5.5}R^{0.5} \qquad (4\text{-}17)$$

وحيث أنه في النجوم ذات الكتلة المنخفضة يكاد يحدث التغير في تركيبها الكيميائي وفي لمعانها بعد بلايين السنين ، وعند ثبوت κ فإن العتامة تشتت الإلكترون الذي يُحدد بواسطة التركيب الكيميائي، لذا من (4-15) تصبح

$$L \propto \mu^{4}M^{3} \qquad (4\text{-}18)$$

ومن هذه المعادلة (4-18) في حالة النجوم ذات الكتلة العالية ، حيث يتغير تركيبها ولمعانها سريعاً، لذا كلما كانت كتلة النجم ولمعانه كبيرة فإن نهاية النجم تكون سريعة على التتابع الرئيسي. ويستهلك من الهيدروجين حوالي 10% من كتلة النجم قبل أن يخرج مبتعداً عن التتابع الرئيسي. والسبب أن معدل الطاقة الكلية للنجم يساوي لمعان النجم حيث يعيش النجم على التتابع الرئيسي حوالي بضع مليون سنة. و حيث R تحدد من خلال الكتلة M و درجة الحرارة عند المركز T_c تحدد من (4-8) ومن L خلال (4-17) و(4-18) ولذا يعد التتابع الرئيسي الموضع لقيم (L, T_e) لنجوم ذات كتل مختلفة.

ولحل المعادلات السابقة وإيجاد قيم متغيراتها لابد من الأخذ في الاعتبار هذه النقاط :

أ- القيمة العددية لـ κ تكون في حدود الوحدة.

ب- تدفق الطاقة عبر سطح النجم تكون في حدود 10^{10}إلى 10^{14} أرج سم$^{-2}$ ث.

ت- المحتوى الحراري الكلي $Q(total)$ للغاز المكون للنجم يعطى بـ

$$Q(total) = \int dQ = \int C_V dT + \int PdV = \int C_P dT$$
$$= (5/2) \square T = 2\text{x}10^{8} T \ \text{erg mol}^{-1} \quad \text{وذلك للغاز المثالي} \qquad (4\text{-}19)$$

ث- زمن تبريد النجم $t(cooling)$ يساوي

$$T(cooling) = Q(total)/L \qquad (4\text{-}20)$$

ج- المحتوى الحراري بواسطة الإشعاع يعطى بـ

$$Q(rad) = \sigma T^4 = 7.5\text{x}10^{-15} T^4 \ \text{erg cm}^{-3} \qquad (4\text{-}21)$$

ح- زمن انتقال الإشعاع من مركز النجم إلى السطح يساوي

$$t(rad) = Q(total, rad)/L \qquad (4\text{-}22)$$

خ- سرعة الصوت (سرعة موجات الضغط) خلال الغاز قي باطن النجم هي

$$v = (\gamma P/\rho)^{0.5} = (\gamma \square T/ \mu)^{0.5} \qquad (4\text{-}23)$$

د- بفرض أن طاقة النجم تحمل للخارج بواسطة تيارات الحمل convection أكثر الإشعاع . وبفرض أنه عند أي مسافة من المركز ، أن نصف المادة يتحرك إلى الخارج بدرجة حرارة T وبسرعة v وأن النصف الأخر يتحرك للداخل بدرجة حرارة T–ΔT وبسرعة v ، وبهذا تكون كمية الطاقة المنتقلة تساوي

$$H = Q\,v\rho/\mu \ \ erg\ cm^{-3}\ s^{-1}$$

و باستخدام المعادلة (4-19) تصبح

$$H = 2x10^{8}\,v\rho\,\Delta T/\mu \qquad (4\text{-}24)$$

مثال : إذا علمت أنه في باطن الشمس $\mu=0.5$ و $\rho=100\ g\ cm^{-1}$ و $T=10^{7}k$ ومتوسط حجم الشمس يساوي $1.4x10^{33}\ cm^{3}$ ونورانية الشمس تساوي $4x10^{33}\ erg\ s^{-1}$. أحسب المحتوى الحراري لكتلة باطن الشمس المتولد من التفاعلات الكيميائية وكذلك المحتوى الحراري الكلي للشمس ، وزمن برودة الشمس . ثم أحسب المحتوى الحراري المتولد من التحول الإشعاعي في مركز الشمس وحسب المحتوى الحراري الكلي للشمس المتولد من التحول الإشعاعي وكذلك زمن التبريد.

الحل : من المعادلة (4-19) نجد أن

$$Q = 2x10^{8}x10^{7} = 2x10^{15}\ erg\ cm^{-1}$$

وبما أن $M = \rho/\mu = 200$

$\therefore Q$(للكتلة السابقة لباطن الشمس) $= QM = 200\ g\ cm^{-3}\ x\ 2x10^{15}\ erg\ mol^{-1} = 4x10^{17}\ erg\ cm^{-3}$

وحيث أن متوسط الطاقة المتولدة في مركز الشمس يساوي 10^{15} فإن المحتوى الحراري الكلي للشمس يساوي

$$10^{15}\ x\ 1.4x10^{33} = 1.4x10^{48}\ erg$$

زمن برودة الشمس يعطى من المعادلة (4-20)

$$\therefore t(cooling) = Q(total)/L = 1.4x10^{48}/4x10^{33} = 3x10^{14}\ s = 10^{7}\ year$$

المحتوى الحراري بواسطة الإشعاع يعطى من المعادلة (4-21)

$$\therefore Q(rad) = 7.5x10^{-15}x(10^{7})^{4} = 7.5x10^{13}\ erg\ cm^{-3}$$

وحيث أن المحتوي الحراري لمتوسط حجم الشمس هو $2x10^{13}$ فإن المحتوي الحراري الكلي للشمس بواسطة الإشعاع يعطى بـ

$$Q(rad, Total) = 2x10^{13}x\ 1.4x10^{33} = 3x10^{46}\ erg$$

وزمن التبريد يعطى بـ (4-22)

$$\therefore t(rad) = Q(rad, total)/L = 7x10^{12}\ s = 5x10^{5}\ year$$

وبالطبع هذا الزمن قليل جداً عن المعروف الآن ، مما يدل على أن الطاقة داخل الشمس ليست ناتجة من التحول الحراري بل إنها طاقة نووية.

3- التوازن الحملي للحرارة Convection Equilibrium

بفرض أن حجم الغاز المكون للنجم يتحرك ثابتاً حرارياً adiabatic من منطقة إلى أخرى. وهذا يعني أنه خلال عملية التغير الحراري لا يحصل فقد أو اكتساب للطاقة وهذا يؤدي إلى

$dQ = C_v\, dT + P\, dV = 0$

و من قوانين الغاز المثالي نحصل على $PV = \square T$ و $V = \mu/\rho$ وبالتعويض في المعادلة السابقة والتكامل نحصل على

$\rho \square T^{Cv/\square}$

ولكن $\square = C_p - C_v$ ، ولذا $C_v/\square = 1/(\gamma-1)$ حيث $\gamma = C_p/C_v$ وعليه

$\rho \square T^{1/(\gamma-1)}$ (4-25)

وبما أن $P \square \rho T$ إذاً

$P \square T^{\gamma/(\gamma-1)}$ (4-26)

وبهذه العلاقة نحصل على الضغط ودرجة الحرارة في اتزان حمل حراري بداخل النجم – حيث أن γ هي النسبة للحرارة النوعية عند ثابت الضغط وثابت الحجم وعليه أن الشرط للحمل الحراري

$\gamma-1/\gamma < 1/n$

حيث أن الكثافة ودرجة الحرارة والضغط هي دوال لنصف القطر بداخل النجم أي $P(r)$, $T(r)$, $\rho(r)$.

4-اتزان الإشعاع Radiative Equilibrium

إن الضغط الكلي P عند أي نقطة في جسم النجم هو المجموع لضغط الغاز وضغط الإشعاع

$P = P(gas) + P(radiative)$ (4-27)

حيث أن

$P_g = (\square/\mu)\,\rho T$ و $P_r = (1/3)\, a\, T^4$

وبكتابة $P_g = \beta P$ فتصبح $P_r = (1-\beta)P$ وهذا يؤدي إلى أن الضغط الكلي يمكن التعبير عنه بـ

$$P = \rho \square T/\mu\beta = a\,T^4 / 3(1-\beta) \qquad (4\text{-}28)$$

و من هذه العلاقة أن الكثافة يمكن التعبير عنها بـ

$$\rho = \{a\mu\beta/3\square\ (1-\beta)\} / T^3$$

و إذا كانت β ثابت فإن

$$\rho = k\,T^n \qquad (4\text{-}29)$$

وهي معالجة لكرة الغاز متعدد الطرز (polytropic) فإذا كانت نسبة ضغط الغاز إلى ضغط الإشعاع ثابتة في النجم فهو متعدد الطرز (الانتحاء) لمعامل $n = 3$ حيث أن منطقة الحمل الحراري لها معامل $n = 3/2$ (من المعادلة 4-25) بـ $\gamma = 5/3$.

4-1-2 معادلات البنية النجمية

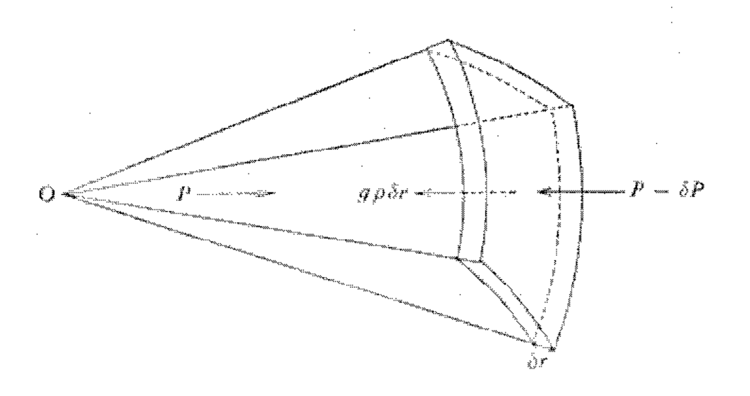
هنا سوف نحاول شرح معادلات البنية النجمية Equations of Stellar Structure لنموذج نجم تتابع رئيسي بالتفصيل. بفرض كرة من الغاز في حالة اتزان هيدروستاتيكي تنتقل خلالها الطاقة بواسطة الإشعاع وليس بواسطة المجال المغناطيسي أو الدوران.

1- معادلة توزيع الكتلة Equation of Distribution of Mass

إذا كانت M_r تمثل الكتلة المحتوية بداخل نصف قطر r ولها الكثافة ρ عند r فإن

$$Mr = \int_0^r 4\pi \rho r^2\, dr \qquad (4\text{-}30)$$

حيث يبين الشكل (4-1) قوى الضغط والجاذبية المؤثرة على وحدة المساحة لقشرة رقيقة للمادة عند أي مسافة r من مركز النجم.



الشكل (4-1): يبين قوى الضغط P والجاذبية $g\rho\delta r$ على وحدة مساحة للقشرة رقيقة من المادة عند أي مسافة r من مركز النجم.

2 معادلة الاتزان الهيدروستاتيكي Equation of Hydrostatic Equilibrium

هذه المعادلة تنص على أنه يوجد توازن وتنظيم بين الحرارة والضغط، أي أن هناك قوة جاذبية إلى المركز النجم وقوة ضاغطة إلى خارج النجم ، لذلك نجد أن الضغط الداخلي للنجم عالي لأن الطاقة الحرارية النووية تحفظ الحرارة الداخلية. والنجوم ذات الكتلة الضخمة تضغط على الطبقات الداخلية.

من الشكل (1-4) نعتبر القوة المؤثرة على وحدة المساحة لقشرة من المادة ذات سماكة δr عند مسافة r من المركز O عند الاتزان تكون

$\delta p = - g \rho \delta r$

حيث $g = GM_r/r^2$ قوة الجاذبية لوحدة الكتلة عند المسافة r ، فمعادلة الاتزان الهيدروستاتيكي تصبح

$$dP / dr = - (GM_r /r^2) \rho \qquad (4\text{-}31)$$

3 معادلة انتقال طاقة الإشعاع Equation of Radiative Energy Transport

إن التدفق لطاقة الإشعاع عبر وحدة المساحة في وحدة الزمن تمثل بـ F وتشير κ إلى معامل امتصاص الكتلة (العتامة) ، أي جزء الإشعاع الممتص خلال الكتلة $\rho\delta r$ كما في شكل (1-4) ، وبالتالي

$\delta F/F = k\rho\delta r$

إن العزم المنتقل من الإشعاع إلى هذه المادة لابد أن يغير في ضغط للإشعاع فوق δr وعليه يصبح أن

$\delta P(rad) = -\delta F/c = - Fk\rho\delta r/c$

وبالتالي

$$F = - (c/ \kappa\rho) (dP_{(rad)} / dr) \qquad (4\text{-}32)$$

حيث $P_{(rad)} = (a/3)T^4$.

فإذا كان النجم في حالة اتزان فإن التدفق للإشعاع الذي يعبر السطح الكروي الكلي عند r يكون ثابت ويساوي النورانية ، أي أن

$$L = 4\pi r^2 F = -(4\pi r^2 c/\kappa\rho)\, d(aT^4/3)/dr$$

وبتفاضل المعادلة السابقة تصبح النورانية

$$L = -(16\pi ac/3\kappa\rho)\, r^2 T^3 \, dT/dr \qquad (4\text{-}33)$$

4 معادلة إنتاج الطاقة : Equation of Energy Production

إذا كان $L(r)$ تشير إلى التدفق الخارجي للطاقة عبر السطح الكروي لنصف القطر r بحيث تكون $L=L(R)$ ففي حالة الاتزان يكون متوسط إنتاج الطاقة لوحدة الكتل عند نصف القطر r باستخدام المعادلة (4-4c) هو

$$\varepsilon = dL(r)/dM_r \qquad (4\text{-}34)$$

وهذه المعادلة مفيدة خاصة عندما نتعامل مع الطاقة المنتجة بواسطة التحول النووي لأنها تعتمد على $T(r)$ و $\rho(r)$ والتركيب الكيميائي للنجم.

مع إعادة كتابة الأربع معادلات السابقة (34 ، 33 ، 31 ، 30) مع M_r كمتغير مستقل

$$dr/dM_r = 1/4\pi r^2\rho \qquad (4\text{-}35a)$$

$$dP/dM_r = -GMr/4\pi r^4 \qquad (4\text{-}35b)$$

$$dT/dM_r = -(3kL/64\pi^2 a r^4)(1/T^3) \qquad (4\text{-}35c)$$

$$dL/dM_r = \varepsilon \qquad (4\text{-}35d)$$

حيث تعتبر معادلات (4-35) أساسية لبنية النجوم المتماثلة كروياً في اتزان شبه مستقر. نجد في هذه المعادلات ثلاثة متغيرات وهي الكثافة ρ ودرجة الحرارة T والتركيب الكيميائي التي يعتمد عليها كل من الضغط P والعتامة κ ومصدر الطاقة ε. ويمكن الحصول على متغيرات مستقلة $r(M_r)$, $\rho(M_r)$, $T(M_r)$, $L(M_r)$ من المعادلات التفاضلية (35). و لحل هذه الأربع معادلات تحتاج إلى الشروط الحدية التالية

$$\left.\begin{array}{ll} r = 0\ ,\ L = 0 & \text{at}\quad M_r = 0 \\ \rho = 0\ ,\ T = 0 & \text{at}\quad M_r = 0 \end{array}\right\} \qquad (4\text{-}36)$$

التي يمكن بواسطتها حساب التركيب النجمي.

3-1-4 حالة الاستقرار *stability*

عندما يكون النجم في حالة استقرار فإنه لابد من وجود اتزان حراري بين مجموع القوى للتمدد الداخلي (أي مجموع الضغوط المتباينة داخل جسم النجم والقوة الطاردة المركزية) وقوى الانكماش (أي مجموع الضغوط الخارجية على سطح النجم والجاذبية الذاتية) كما تنص نظرية فريال (Virial Theorem). لنفترض أن النجم يتركب من جسيمات ذرية لكل نوع من الجسيم له كتلة m وموضع $\bar{r}$ وينطلق بقوة $\bar{F}$ فإن تسارع العزم الذاتي للجسيمات الناتج من القوى النهائية المؤثرة عليه هي

$$\frac{d^2 I}{dt^2} = \frac{d^2}{dt^2}\sum\left(m\bar{r}^2\right) = \sum 2\left[m\left(\frac{d\bar{r}^2}{dt^2}\right) + \bar{F}\bar{r}\right]$$

$$\therefore\ 1/2\ \ d^2I/dt^2 = 2\,(K.E) + \sum\ \bar{r}\ \bar{F} \qquad (4\text{-}37)$$

حيث $\sum\ \bar{r}\ \bar{F}$ تمثل طاقة الوضع (Potential) و K.E. تمثل طاقة الحركة. ولحدوث الاستقرار فإن القوى النهائية المؤثرة على توزيع الجسيمات تساوي صفراً أي أن

$$2\,(K.E) + (P.E) = 0 \qquad (3\text{-}38)$$

ومن المعروف أن طاقة الوضع V للنجم هي طاقة الوضع للجاذبية Ω وكذلك الطاقة الحركية (K.E) هي عبارة عن الطاقة الحرارية (T.E) لذلك

$$K.E = T.E = (3/2)\,\square\ \ T = (3/2)(C_p-C_v)T = (3/2)(\gamma-1)C_vT = (3/2)(\gamma-1)\,U\quad mol^{-1} \qquad (4\text{-}39)$$

حيث U الطاقة الحرارية الداخلية وتعطى بواسطة $dU = C_V\, dT$

وفي حالة الاستقرار فمن المعادلات (4-39) و(4-38) نحصل على

$$3(\gamma-1)\,U + \Omega = 0 \qquad (4\text{-}40)$$

وعلى هذا تكون الطاقة الكلية هي $E = U + \Omega$. وفي حالة الغاز المثالي $U = (3RT/2)\ mol^{-1}$ ، أما في حالة الغاز المتعدد فإن $U = (nRT/2)\ mol^{-1}$ ، وبالتالي $C_v = nR/2$ ، وحيث أن $R = C_p - C_v$ فإن

$$C_P/C_V = \gamma = 1 + 2/n \qquad (4\text{-}41)$$

وفي حالة الغاز المثالي $n = 3$ وكذلك $\gamma = 5/3$ بينما في حالة الإشعاع $n = 6$ وكذلك $\gamma = 4/3$. لذا تصبح γ في حالة امتزاج الغاز والإشعاع

$$4/3 \le \gamma \le 5/3 \qquad (4\text{-}42)$$

ومن المعادلات (4-27) و(4-8) و(4-1) وأيضاً من $P_r \propto M^4/R^4$, و $P_{Total} \propto M^2/R^4$ نحصل على

$$P_{Total} / P_{radiation} = 1 + P(gas)/P(radiation) \propto M^{-2} \qquad (4\text{-}43)$$

ومنه نجد طاقة الوضع للجاذبية هي

$$\Omega = -q\,(GM^2/R) \qquad (4\text{-}44)$$

حيث q عبارة عن العامل العددي المعتمد على الكتلة بداخل النجم. لذلك الطاقة الكلية تنقص بنقصان R وتزداد الطاقة الداخلية مصدرها هي الجاذبية (أثناء انكماش النجم) ومن هذه الزيادة للطاقة الداخلية تزداد درجة الحرارة ويصبح النجم أكثر لمعاناً وسخونة. وعند خروج الطاقة الداخلية الحرارية تزداد الطاقة الوضعية الجاذبية Ω قليلاً وبالتالي يتمدد النجم الضخم. وأن مصدر لمعان نجوم التتابع الرئيسي هي تلك الطاقة المنطلقة بواسطة الاصطناع النووي (Nuclear-Synthesis) حيث يصبح التغير في الطاقة الوضعية صغير نسبياً جداً.

أما في حالة النجوم متعددة الطرز (ploytrope) من الغاز بمعامل $n=3$ و $4/3 \le \gamma \le 5/3$ ، وفي حال ثبات النسبة بين ضغط الغاز وضغط الإشعاع في كل النجم ، وبتحقق شرط المعادلة (40 -4) ، وباستخدام المعادلة (4-27) و (4-28) نجد أن الطاقة الداخلية وطاقة الجاذبية يكونا :

$U = (3/2)PV = 3\Re T/2\beta\ \ mol^{-1}$ و $\Omega = -q\mu GM/R\ \ mol^{-1}$.

وباستخدام قيمة U و Ω نحصل على حالة الاستقرار تكون عند $\beta > [3(\gamma-1)\, \Re\, T\, R / \mu\, GM]$

وباستخدام المعادلة (4-27) و (4-28) بعد حزف درجة الحرارة T و n=3 يصبح الضغط الكلي للغاز $P=K\rho^n$ حيث $K=(3\Re^4(1-\beta)/a\mu^4\beta^4$.

مثـال: فـي نجـوم التتـابع الرئيـسي متعـددة الطـراز مـن الغـاز بمعامـل n=3 ، إذا كـان $M/R \approx M\odot/R\odot=3x10^{22}$ ودرجـة الحـرارة المتوسـطة تـساوي 0.4 درجـة حـرارة المركـز تـساوي تقريباً $8x10^6K$ ومتوسط الوزن الجزئي $\mu=0.6$ وكانت $4/3 \leq \gamma \leq 5/3$. باستخدام هذه القيم في المعادلة السابقة لـ β نجد أن لابد من أن تكون $\beta > 0.6$ ليكون النجم في حالة اتزان على التتابع الرئيسي. في هذه الحالة يصبح ضغط الغاز أكثر من 60% من الضغط الكلي ، ويعني هذا أن ضغط الإشعاع لابد أن يكون أقل من 40% من الضغط الكلي.وإذا ذاد ضغط الإشعاع عن هذه القيمة فإن ضغط الإشعاع يجعل مادة النجم تتحرك في اتجاه معاكس لمركز النجم (أي للخارج).

الآن من المعادلة (4-43) نلاحظ أنه عند زيادة كتلة النجم فإن ضغط الإشعاع يزيد عن ضغط الغاز ، وهذا يعني أنه توجد قيمة حدية للكتلة عندها تكون قوة الانكماش التجاذبي غير قادرة على إعادة المادة التي تطردها قوة ضغط الإشعاع للخارج ، وهذا الحد هو $M<114M\odot$.

4-1-4 معادلة الحالة Equation of State

لحل معادلات البنية النجمية لابد من تحديد معادلة الحالة للمادة المكونة للنجم عل شكل أن الضغط الكلي دالة في الكثافة ودرجة حرارة النجم والتركيب الكيميائي. إن نجوم التتابع الرئيسي ذات الكتلة المتوسطة أو الكتلة العالية تكون كثافتها منخفضة وتكون لحرارتها مماثلة لدرجة حرارة الغاز المثالي ومن (4-27) فإن

$$P = (\square/\mu)\,\rho\,T + (a/3)\,T^4 \qquad (4\text{-}45)$$

وبما أن الغاز متأين في باطن النجم تماماً فإن الوزن الجزيئي μ يعطى بالعلاقة

$$\mu = (2X+3/4\,Y+1/2Z)^{-1} \qquad (4\text{-}46)$$

حيث X و Y و Z هما نسبة شيوع (وفرة) الهيدروجين والهليوم والعناصر الثقيلة على التتابع بالنسبة لكتلة النجم.

وفي حالة نجوم التتابع الرئيسي ذات الكتلة منخفضة فإن الكثافة تصبح عالية. وهذا يؤدي إلى أن معادلة الحالة للغاز المثالي لا يمكن أن تستخدم، حيث أن خواص الغاز في الكثافة العالية يؤدي إلى عملية تحلل الإلكترونات degenerate وأيونات غير منحلة ، وبالتالي يمثل كلٌ من للإلكترونات المنحلة والأيونات الغير المنحلة الضغط الكلي للغاز أي أن

$$P_{gas} = P_{ion} + P_{(degenerate\ electron)} \qquad (4\text{-}47)$$

حيث $P_{(ion)} = n_i\,KT = \rho\,KT/\,\mu_i$

m_H

هناك حالتين تصفان ضغط الغاز تتوقفان على صورة الانحلال للإلكترونات أولهما: إذا كانت الطاقة الحركية للإلكترونات المنحله أقل بكثير من m_ec^2 ويكون الانحلال غير نسبي (non-relativistic-degenerate) والكثافة الكلية للغاز $\rho \le 10^5$ g.cm^{-3} فإن

$$P(d.e) = K_d\,(\rho/\mu_e)^{5/3} \qquad (4\text{-}48)$$

حيث $K_d = (3/8\pi)^{2/3}\,h^2/5m_em_H^{5/3}$ عدد كتل البروتون لكل إلكترون حر. ثانياً إذا كانت الطاقة الحركية للإلكترونات ليست أقل بكثير من m_ec^2 والانحلال نسبي والكثافة $\rho < 10^5$ g.cm^{-3} فإن

$$P(d.e) = Kr\,(\rho/\mu_e)^{4/3} \qquad (4\text{-}49)$$

حيث $Kr = (1/8)\,(3/\pi)^{1/3}\,(hc/m_H^{4/3})$. والعدد الكلي للإلكترونات في وحدة الحجم للغاز

$$n_e = 2\int_o^{Po} (4\pi P^2/h^3)\,dP = (8\pi/3)\,P_o^3/h^3 \qquad (4\text{-}50)$$

وحيث أن الضغط هو متوسط معدل انتقال الزخم عبر المساحة ، ولذلك فإن ضغط الغاز المتأين في حالة الانحلال الغير نسبي يعطى بـ

$$P_e = (3/8\pi)^{2/3}\,(h^2/5m_e m_H^{5/3})(\rho/\mu_e)^{5/3} \qquad (4\text{-}50a)$$

أما في حالة الانحلال النسبي فإن

$$P_e = (1/8)\,(2/\pi)^{1/3}\,(hc/m_H^{4/3})(\rho/\mu_e)^{4/3} \qquad (4\text{-}50a)$$

باستخدام المعادلة (4-45) و (4-50a) و (4-50b) في معادلة الاتزان الهيدروستاتيكي (4-35b) لحل معادلات البنية النجمية.

5-1-4 مصدر الطاقة والتفاعلات في النجوم:

دلت الدراسات الجيولوجية أن عمر الشمس ما يقرب من $5x10^9$ سنة أو أكثر وهذا العمر أكثر بكثير من العمر الذي تم حسابه في المثال السابق. و حيث أن الإشعاع النجمي يمكننا من معرفة ذاك المصدر؛ وعلى سبيل المثال الإشعاع الشمسي الذي ليس مبنياً على حدوث تفاعلات كيميائية عادية، فإذا كانت الشمس مكونة من الكربون والأوكسجين فقط فإن اتحادهما لا يستطيع أن يعطي تلك الكمية الهائلة من الطاقة التي تشاهدها اليوم ولن تدوم عشرات بلايين السنين كما قدره العلماء ولانطفأت منذ بلايين السنين.

خلال دراسة تاريخ الأرض ونشوء الكائنات الحية عليها، ثبت أن درجة حرارة سطح الأرض لم تتغير منذ مئات الملايين السنين؛ مما يدل على أن شدة الإشعاع الشمسي لم تتغير منذ دهور من حياة الشمس. أيضاً طاقتها الحرارية لم تكن ناتجة من تلك التفاعلات العادية حيث أعتقد سابقاً سبب نشوء تلك الطاقة هو تقلص كتلة الشمس بتأثير قوة جاذبيتها الشديدة على المادة المكونة لها وبعد حساب كمية طاقتها المتحررة لم يروا انسجام مع تقلص الكتلة ، أي أن

$$E(grav) \approx GM/R= 2x10^{15} \text{ erg } g^{-1}$$

ولذلك توصل العلماء إلى سلاسل التفاعلات النووية.إذ تبلغ درجة حرارة الشمس في مركزها 20 مليون درجة مطلقة، وهذا يشير إلى تفاعلات نووية كافية لإعطاء البروتونات طاقة حركية هائلة لإنتاج تفاعلات الاندماج بين النوى المختلفة. وأصبح المفتاح لتوليد تلك الطاقة النجمية بالنسبة للنجوم العادية هي تحول الوقود الهيدروجيني الموجود بوفرة إلى غاز الهليوم.

ولقد تم حساب طاقة الشمس وفقاً لعلاقة اينشتاين المشهورة؛ هي الطاقة المتولدة تساوي التغير في الكتلة × مربع سرعة الضوء

$$E = \Delta mc^2 \qquad (4-51)$$

حيث Δm تساوي 0.0292 وحدة كتلة ذرية من الفرق من أربع نوى من الهيدروجين ونواة من الهليوم وعليه تكون الطاقة المرتبطة بالكتلة $E = 0.0292 \times 931.478 = 27.20$. وهذا التحول يعطي تفسيراً كافياً للطاقة الإشعاعية الصادرة عن الشمس. في الحقيقة إن بناء ذرات أثقل من

وبالتالي يتوقف تطور النجم على مصدر الطاقة النجمية التي تجعله أن يستمر على الحياة وهما وسيلتين لتكوين الطاقة:

1) بناء ذرات أثقل من عنصر الهيدروجين.
2) الإفناء الفعلي للمادة.

فالأول تبنى فيه عناصر أثقل من الهيدروجين والذي يكون احتماله أكبر. وأما الثاني فتدل الأبحاث النظرية أنه لا يحدث إلا عند درجة حرارة تقدر بآلاف عدة ملايين الدرجات، حيث تكون درجة الحرارة القصوى في داخل النجم نحو 20 مليون درجة مئوية، وأيضاً لا نتوقع عند هذه الدرجة حدوث إفناء للمادة.

لذا تبدو كلتا العمليتين محتملة وتحدث كلاهما في الوفرة النسبية للعناصر الأخف في تركيب مادة الشمس مثلا وفي النجوم تحدث عناصر الليثيوم والبر ليوم على سبيل المثال لندرتها النسبية في وفرة العناصر.

تختلف سرعات استهلاك النجوم لحياتها فكلما كانت كتلة النجم أكبر ارتفعت درجة حرارة باطنه أكثر وبالتالي يستهلك وقوده خلال مدة زمنية أقصر، وعلى سبيل المثال، إذا كانت كتلة النجم عشرة أضعاف كتلة الشمس فإنه يقضي على خط التتابع الرئيسي 20 مليون سنة فقط بالمقارنة مع آلاف مليون سنة يقضيها نجم شبيه بالشمس على خط التتابع الرئيسي. وتمتد أحياناً حياة النجم الشبيه بالشمس إلى حوالي 11 ألف مليون سنة. وهذا يتمثل الفائدة في تحديد العمر للنجم من خلال الأرصاد المتوافرة عنه ووضعها على مخطط هرتز سبرنغ-راسل.

وقبل أن نتكلم عن التفاعلات النووية في باطن النجوم لابد وأن نتكلم عن عملية الاصطناع النووي.

1- الاصطناع النووي Nuclear Synthesis:

إذا فرضنا أن الطاقة التي تنتج بالتفاعلات النووية تعتمد على درجة حرارة المادة التي هي مصدر الطاقة عند مركز النجم لذلك لحساب الطاقة المتحررة بعمليات الاندماج لابد من دراسة المقطع العرضي للاصطدام collision cross section ومعدل الاصطدام بين الأنويه

أ- إمكانية النفاذ Probability of Penetration:

لنعتبر هناك نواتان لهما شحنتين كهربائيتين Z_2e, Z_1e تبعدان عن بعضهما مسافة قدرها r فإن طاقة الوضع المشتركة هي

$$\psi = Z_1 Z_2 e^2/r \qquad (4\text{-}52)$$

وطاقة الحركة المشتركة هي $E = P^2/2m$، حيث P هي العزم أو الزخم و $m=m_1m_2/(m_1+m_2)$ هي الكتلة المخففة reduced لذا تصبح المعادلة معادلة احتمالية اختراق (أو إمكانية نفاذ) حاجز الجهد هي

$$P(p) = e^{-(\alpha-\beta)} \qquad (4\text{-}53)$$

حيث

$$\alpha = 2\pi^2(2m)^{1/2}\ Z_1 Z_2 e^2/hE^{1/2}$$

$$\beta = 8\pi(2m)^{1/2}\ (Z_1 Z_2 e^2 r)^{1/2}/h$$

ب- معدل التصادمات Rate of Collisions:

بفرض نواتين لهما نوعين من الكثافة العددية في وحدة الحجم N_1, N_2 . وبفرض أيضاً υ و E هما السرعة والطاقة للحركة النسبية لهما و σ هي مقطع العرضي للتصادم المتبادل بين النواتين و m هي الكتلة المخففة. فإن معدل التصادم بالنسبة لوحدة الحجوم بين النواتين اللتان تتحركان بسرعة نسبية في نطاق أو مدى υ إلى $\upsilon+d\upsilon$ هو

$$dN/dt = \{(8\pi N_1N_2)/(2\pi kT)^{3/2}\}\{\sigma/m^{1/2}\}\exp(-E/\pi kT)EdE \qquad (4\text{-}54)$$

ج- المقطع العرضي للتصادم Collision cross section:

عندما تقترب نوتان لهما زخم متبادل قدرة P من الحد الكافي الذي يجعلنا لا نستطيع أن نميزهم عن بعضهما ، فإنهما في هذه الحالة يصطدمان ويكون عزمهما يساوي $P=h/2\pi r_e$ حيث r_e هو احتمالية موضع أي من النواتين. وبالتالي فإن المقطع العرضي للتصادم يعطى بـ

$$\sigma = \pi r_e^2 = h^2/4\pi P^2 = h^2/8\pi mE \qquad (4\text{-}55)$$

د- احتمالية تحول العناصر لكل النفاذية Probability of Transmutation per Penetration:

باستخدام مفهوم بوهر لاتحاد نواتين ، حيث أنه افترض عندما تتداخل نواتين فإن طاقة تصادمهما تساهم من خلال مكونات النواتين لتكوين مركب نووي في حالة إثارة. وإذا استمرت حالة الإثارة لمدة كافية ، فإن المركب سوف يخرج طاقة الإثارة على شكل طاقة كهرومغناطيسية ثم يتكون مركب نووي ثابت في حالة عدم إثارة .

وحيث انه في حالة الإثارة سوف يكون هناك عدد من مستويات الطاقة ، وبفرض أن اتساع تلك المستويات يساوي ΔE وبفرض أن τ هي الزمن الذي يستغرقه المركب النووي في حالة الإثارة. وباستخدام مبدأ الريبة uncertainty principle نجد أن

$$\Delta E\ \tau = h/2\pi \qquad (4\text{-}56)$$

و أن اتساع الزخم (العزم) هو ΔP المناظر لهذه الحالة يكون

$$\Delta P r_e = h/2\pi \qquad (4\text{-}57)$$

حيث r_e نصف قطر المركب النووي.

ومع طول الوقت وبقاء المركب النووي كما هو فإن احتمالية التحول إلى عنصر جديد يعطى بـ $P(T) \propto \tau$.

وإذا كان t هو الزمن اللازم لكي يبقى المركب النووي ليخرج الإشعاع الكهرومغناطيسي ويتحول إلى نواه جديدة. في حالة تقارب الزمنيين τ و t فإن احتمالية التحول إلى عنصر جديد تصبح

$$P(T) = \tau/t \qquad (4\text{-}58)$$

وحيث أن $\Delta E=\Delta P/m$ وباستخدام المعادلات (4-56), (4-57), (4-58) وكتابة $\Gamma = 1/t$ فإن

$$P(T) = 2\pi m\Gamma r_e/h \qquad (4\text{-}59)$$

هـ - معدل تحول العناصر Rate of Transmutation:

مما سبق يمكن الآن أن نكتب معدل التحول من عنصر لآخر في وحدة الكتل بـ

$$dN(trans)/dt = [P(p)P(T)/\rho]\ dN/dt$$

وباستخدام المعادلة (4-59), (4-55), (4-54), (4-53) فإن

$$dN(trans)/dt = 5.3 \times 10^{25}\ \rho(X_1/A_1)\ (X_2/A_2)\ \Gamma\sum\phi^2\ e^{-\phi} \qquad (4\text{-}60)$$

حيث معامل المقطع العرضي هو $\sum = r_0{}^2/(AZ_1Z_2)^3 \times \exp(2r_0{}^{1/2})$. وأن الطاقة النسبية للتصادم
$\phi = \varphi_o\,(AZ_1{}^2Z_2{}^2/T)^{1/3}$ و X_1,X_2 هي الوفرة النسبية للهيدروجين للكتل الذرية A_1,A_2.

و- معدل الطاقة المتولدة Rate of energy Generation
بفرض أن Q هي كمية الطاقة المخزنة من كل تحول نووي (أي من عنصر إلى آخر) ،
لإغن معدل الطاقة المتولدة في وحدة الكتل تكون

$$\varepsilon = Q\ \ dN(trans)/dt \qquad (4\text{-}61)$$

2 سلاسل التفاعلات النووية

سوف نقدم بوصف الدورات المهمة التي تحصل بداخل النجم والتي تبدأ بمرحلة التتابع الرئيسي، ونجمل هذه في التفاعلات التالية:

(أ) سلسلة تفاعلات بروتون – بروتون:

$$\left.\begin{array}{l} a)\ {}^1H + {}^1H \rightarrow {}^2H + \nu + e^+ \\ b)\ {}^2H + {}^1H \rightarrow {}^3He + \nu \\ c)\ {}^3He + {}^3He \rightarrow {}^4He + 2\,{}^1H \end{array}\right\} \qquad (4\text{-}62)$$

تندمج في التفاعل (a) نواتا هيدروجين لتكوين هيدروجين ثقيل ^2H (الديوتريوم D) وينطلق إلكترون موجب (بوزيترون +e) وجسيم نيوترينو v . وبسرعة يترك النيوترينو النجم أما البوزيترون فإنه يتحد مع الإلكترون ليعطيا أشعة جاما. ولما كانت نواة الهيدروجين العادي تتكون من بروتون (جسيم مادي موجب الشحنة يكون جزءاً من أنبوبة الذرات ويعادل في المقدار الوحدة السالبة الموجودة على الإلكترون وتعادل كتلته 1.672×10^{-27} Kg وتعادل شحنته 1.6×10^{-19} كولوم). فإن التفاعل (a) يستهلك في واقع الأمر بروتونين (ولذا سميت هذه

متوسط العمر	طاقة التحول	مقطع التصادم	التفاعل
$3x10^{17}$ s	1.443 MeV	$2.9x10^{46}$ keV cm^{-2}	a
6 s	5.494 MeV	$1.0x10^{28}$ keV cm^{-2}	B
$3x10^{13}$ s	12.847 MeV	$2.0x10^{27}$ keV cm^{-2}	c

هناك تفاعل آخر ينشأ من التفاعل الثاني (4-62b) وهو

$$\left.\begin{array}{l} a)\ {}^3He + {}^4He \rightarrow {}^7Be + \gamma \\ b)\ {}^7Be + e^- \rightarrow {}^7Li + \nu \\ c)\ {}^7Li + {}^1H \rightarrow 2{}^4He \end{array}\right\} \qquad (4\text{-}63)$$

و هناك أيضاً تفاعل آخر ينشأ من (4-63a) وهو

$$\left.\begin{array}{l} a)\ {}^3He + {}^4He \rightarrow {}^7Be + \gamma \\ b)\ {}^7Be + {}^1H \rightarrow {}^8B + \gamma \\ c)\ {}^8B \rightarrow {}^8Be + e^+ + \nu \\ d)\ {}^8Be^* \rightarrow 2{}^4He \end{array}\right\} \qquad (4\text{-}64)$$

هذه (*) الإشارة تشير إلى أن نواة العنصر في حالة مثارة.

أيضاً هذه التفاعلات تحدث في النجوم الباردة نسبياً كما في الشمس، وبصفة خاصة العملاقة الحمراء. و الكلية المنطلقة من هذه العملية

$$Q = 2(Q_a + Q_b) + Q_c = 26.207 \text{ MeV} \qquad (4\text{-}65)$$

وعموما معدل إنتاج الطاقة يحكم بواسطة أضعف تفاعل في السلسلة السابقة - الذي له مقطع عرضي صغير – وهو (4-62a). وبالتالي فإن معدل إنتاج الطاقة يتم حسابه بواسطة المعادلة (4-61) باستخدام المعادلة (4-65) والمعادلة (4-60) حيث r_e هي نصف قطر ذرة

$\varepsilon(pp) = \varepsilon(pp)_o \, \rho X^2 f(T)$		(4-66)

ومن قوانين البنية النجمية يمكن لحساب $f(T)$ بواسطة الصيغة التقريبية

$f(T) = T^n$; حيث $n = d\log\varepsilon / d\log T$		(4-67)

حل معادلات البنية التحتية للنجوم الأقزام في التتابع الرئيسي دلتنا على إن درجة حرارة مركز هذه النجوم يبلغ حولي $10^7 K$ ، وعند هذه الدرجة تكون تفاعلات بروتون – بروتون أكثر فاعلية من التفاعلات الاندماجية التي تكون الكربون والنيتروجين.

أما ففي حالة مجموعة النجوم الأقزام وباستخدام معادلة كرامر (4-13) واستخدام

$L = 4\pi R^2 H$ و $T_c \alpha M/R$ و $\rho \alpha M/R^3$ و $T \alpha T_c$

فإن معادلة تدفق الطاقة تعطى بـ

$L = C_1 M^5 T_c^{0.5}$		(4-67)

حيث C_1 تمثل مجموع الثوابت السابقة ، و من المعادلة (4-34) ,(4-65) , (4-66) فإن إنتاج الطاقة هو

$L = \bar{\varepsilon} \, \square \, \rho M T^4 = C_2 T_c^7 / M$		(4-68)

حيث C_2 تمثل مجموع الثوابت في المعادلات التي استنتج منها المعادلة السابقة ، وحيث أن الطرف الأيسر في المعادلة (4-67) يساوي الطرف الأيسر من المعادلة (4-68) ، إذاً

$T_c = (C_1/C_2)^{1/6.5} M^{0.9}$		(4-69)

(ب) سلسلة تفاعلات الكربون والنيتروجين (CNO):

وهي عبارة عن سلسلة من الكربون والنيتروجين والأوكسجين، وتحدث في نجوم العمالقة ذات الكتلة ضخمة و درجة الحرارة تتجاوز حد ال15 مليون درجة مئوية. وهي تحدث بعد أن يتم تحويل الهيدروجين إلى هليوم.

a) $^{12}C + {}^1H \rightarrow {}^{13}N + \gamma$

b) $^{13}N \rightarrow {}^{13}C + e^+ + \nu$

c) $^1H + {}^{13}C \rightarrow {}^{14}N + \gamma$

$$\text{d) } {}^{1}H + {}^{14}N \rightarrow {}^{15}O + \gamma$$
$$\text{e) } {}^{15}O \rightarrow {}^{15}N + e^{+} + \nu \qquad (4\text{-}70)$$
$$\text{f) } {}^{1}H + {}^{15}N \rightarrow {}^{12}C + {}^{4}He$$

وهذه التفاعلات تحدث في ستة أطوار وتستغرق حوالي 7 مليون سنة. وبها تبدأ الدورة في التفاعل (a) باندماج نواة كربون مع نواة هيدروجين لإنتاج نواة نظير النيتروجين 13 وفوتون طاقة قدرها 1.945MeV. بمتوسط عمر $3x10^{14}s$. تتحلل هذه النواة خلال متوسط عمر 420قدرة ثانية لإنتاج نظير الكربون 13 وإلكترون موجب (بوزيترون) وجسيم نيوترينو في التفاعل (b) وتنتج طاقة قدرها 1.502MeV. أما في التفاعل (c) فتنضم نواة الكربون الأخيرة إلى نواة الهيدروجين لإنتاج نواة النيتروجين وإطلاق فوتون طاقة قدرها 7.542MeV في زمن متوسط قدرة حوالي $3x10^{13}s$. بعد ذلك في زمن متوسط قدرة $3x10^{15}s$ تتحد نواة النيتروجين هذه مع نواة الهيدروجين عبر التفاعل (d) لإنتاج نظير الأوكسجين 15 وإطلاق فوتون طاقة قدرها 7.347MeV. لا تلبث نواة الأوكسجين في فترة متوسط مقدارها 82 ثانية أن تتحلل في التفاعل (e) منتجة نظير النيتروجين 15 وبوزيترون وجسيم نيوترينو وطاقة قدرها 1.729MeV. وأخيراً تندمج نواة النيتروجين 15 مع الهيدروجين في التفاعل (f) لإنتاج نواة كربون ونواة الهليوم 4وطاقة قدرها $3x10^{12}MeV$ في زمن متوسط قدرة $3x10^{12}s$.

أقترح بعض العلماء سلسلة تفاعلات أخرى كبديل عن سلسلة (CNO) وهي:

$$\left.\begin{array}{l}\text{a) } {}^{15}N + {}^{1}H \rightarrow {}^{16}O + \gamma \\ \text{b) } {}^{16}O + {}^{1}H \rightarrow {}^{17}F + \gamma \\ \text{c) } {}^{17}F \rightarrow {}^{17}O + e^{+} + \nu \\ \text{d) } {}^{17}O + {}^{1}H \rightarrow {}^{14}N + {}^{4}He\end{array}\right\} \qquad (4\text{-}71)$$

في السلسلة (4-70) يوجد احتمالان أولهما أن يكون التفاعل d هو المتحكم في معدل تفاعلات هذه السلسلة. في هذه الحالة تكون ذرة النيتروجين هي الفعالة ويكون معدل الطاقة المنتجة لهذه السلسلة هو

$$\varepsilon(CN) = \varepsilon(CN)_o\, \rho X Z(N^{14})\, T^{n} \qquad (4\text{-}72)$$

وفي الحالة الثانية أن يكون التفاعل a هو المتحكم في السلسة إي إن ذرة الكربون هي الفعالة فإن معدل الطاقة المنتجة لهذه السلسلة يكون

$$\varepsilon(CN) = \varepsilon(CN)_o \, \rho X Z(C^{12}) \, T^n \qquad (4\text{-}73)$$

في حالة النجوم ذات الكتلة الكبيرة (أي نجوم التتابع الرئيسي العملاقة) ، فمن العلاقة L □ $\mu^4 M^3$ فإن التدفق الخارجي للطاقة هو

$$L = C_3 M^3 \qquad (4\text{-}74)$$

حيث C3 . ومن المعادلة (4-35d) مع استخدام المعادلة (4-72) أو (4-73) فإن الطاقة المتولدة هي

L□ ε̄□□□□ ρ□□□□C□□c 26□□□□

حيث C_4 هو مجموع الثوابت في المعادلة السابقة.و من المعادلة (4-74) و المعادلة (4-75) نجد أن الطرف الأيسر متساوي وهذا يؤدي إلى أن الطرف الأيمن متساوي ، إذاً

$$T_c = (C_3/C_4)^{1/26} \, M^{0.15} \qquad (4\text{-}76)$$

مما سبق يمكن أن نستنتج أن النسبة بين معدل إنتاج الطاقة بواسطة دورة P-P و دورة CN لدرجات حرارة متباينة تكون

$$\varepsilon(CN)/\varepsilon(pp) = \varepsilon(CN)_o/\varepsilon(pp)_o \, [Z(CN)/X] \, T^{n(CN)-n(PP)} \qquad (4\text{-}77)$$

مما يبق نجد أن تتحكم دورة (P-P) في نجوم ذات كتلة صغيرة حيث درجة الحرارة المركزية تزداد ببطيء، بينما دورة (CN) في نجوم ذات كتلة ضخمة فإن إنتاج الطاقة بدورة (CN) تكون أقل بكثير من إنتاج الطاقة بواسطة (P-P).

ولقد وجد أن تركيب الشمس الفيزيائي ودرجة الحرارة لها تتوقفان مع كمية ونوعية الطاقة المشعة من الشمس. أيضاً وجد أن النواة الأولى لنظير الكربون (C^{12}) تنشأ من جديد في السلسلة السابقة. وفي كل مرة يتحول 4 نوى هيدروجين إلى نواة هليوم واحدة حيث تعادل الطاقة المنتشرة خلال الدورة الوحدة 24.7 مليون إلكترون فولت (MeV) مضاف إليها 2MeV، ذلك أنها ناتجة عن إفناء البوزيترونين $2e^+$ مع $2e^-$ إلكترونين سالبين. وهذه الدورة قادرة على جعل الشمس تستمر في إشعاعها لعشرات البلايين السنين القادمة.

أيضاً لو كان حجم الشمس يساوي مرتين من حجمها الفعلي لكانت درجة الحرارة الداخلية لها نصف ما هي عليه الآن ونتيجة لذلك تكون الحرارة المتولدة أقل مما يجب لبقاء إشعاعها. أيضاً لو كانت الشمس نصف ما هي عليه الآن حجماً لتولدت حرارة أكبر مما يجب وهذا ما يفسر لماذا كانت الشمس في حجمها الحالي هذا؟!.

أيضاً مما سبق نجد أن سلاسل التفاعل البديلة تقودنا إلى المرحلة الأخيرة، وتعطى العنصر 4He، ووجد أنها تعتمد على درجات الحرارة وسرعة تصادم الجسيمات مع نوى العناصر المتفاعلة وبروز سلسلة تفاعل عن أخرى يعتمد بشكل رئيسي على التركيب الفيزيائي للنجم ودرجة حرارته وعلى التيارات الحرارية الحملية التي تحدد نوع السلسلة من التفاعلات السائدة، في هذا النجم أو ذاك الآخر.

ولقد وجد بالحساب الآتي:

1) إذا كانت درجات حرارية في مركز النجم منخفضة وتقارب 20 مليون درجة مئوية (مثل الشمس) فإن السلسلة هي سلسلة (P-P).

2) إذا كانت النجوم ذات محتوى معدني عالي ودرجة حرارة أعلى من 20 مليون درجة مئوية فإن سلسلة التفاعلات هي دورة (CNO).

3) إذا كانت النجوم محتوى معدني منخفض فيحدث تأثير في سيطرة الدورة (CNO) حتى إذا كانت درجة الحرارة المركزية لذلك النجم عالية جداً – وأن وصلت إلى أعلى من 27 مليون درجة مطلقة.

4) أن النجوم البراقة الضخمة الكتلة وذات اللب الذي يحدث فيه نقل حراري حملي وأغلفة إشعاعية تظهر فيه الدورة (CNO).

5) النجوم الأخفت وليس لها ناقل حراري حملي ولكن لها منطقة حمل متحركة من المركز فتحدث فيها سلسلة التفاعلات بروتون – بروتون (P-P).

2-4 الجزء العلوي الأيسر من التتابع الرئيسي:

أن التغير في الارتفاع التدريجي للمعان وكتلة النجم ودرجة الحرارة لسطحه يجعله يتحرك على التتابع الرئيسي نحو الأعلى من الجزء الأيمن السفلي متجهاً نحو الجزء العلوي الأيسر ذلك الخط المتقطع من الشكل (2-6). وعندما يكون النجم ذو لمعان وحرارة عالية يصبح الضغط في داخل النجم هو المتحكم وينتهي إشعاعه الذي أنتجته التفاعلات النووية بفعل القوى الجاذبية يمتص المادة النجمية له ويصبح النجم غير متوازن (غير مستقر)، لذا يمكث على التتابع الرئيسي بضع آلاف أو مليون سنة بعد استهلاك كل الهيدروجين بداخله وتفترض النهاية القصوى للكتلة النجمية حوالي 100M☐.
لذلك توجد ثلاثة درجات زمنية لتطور كل النجوم:

(1)سرعة انهيار التجاذب الابتدائي من مادة ما بين النجوم ويصل قطر هذا التكثف حوالي 1000A.U (أي مائة وحدة فلكية) ، ولكي يكون الاتزان الهيدروستاتيكي يحتاج إلى آلاف السنين.

(2)يكون الانكماش التجاذبي تدريجياً قبل التتابع الرئيسي الذي يتطلب في البداية ملايين السنين للاتزان الهيدروستاتيكي، بينما مرحلة التطور لنجوم كونت كتلتها بصعوبة عالية لتشغل الهيدروجين المحترق تستغرق حوالي 100 مليون سنة.

(3)إن التطور على التتابع الرئيسي تكون التفاعلات النووية الحرارية لتغير تركيبه الكيميائي بطيئة، لذا يتطلب لنجم ذات كتلة تساوي 1M☐ بليون سنة لهذه العملية من التفاعلات النووية.

وعموماً هذه الحالات التطورية نسبياً تكون أسرع في النجوم ذات الكتلة العالية وبطيئة في نجوم ذات الكتلة الصغيرة.

3-4 القزم البني Brown Dwarfs:

1-3-4 ما هي الأقزام البنية

عندما نَنْظرُ إلى السماءِ في الليل نرى نقاط ضوء وتكون ليست واضحة من النظرة الأولى هل هي نجوم أو كواكب. فقط بعد الفحص القريب بالآلات المُخْتلفة مثل المناظير وكشّافات الطيف يُمْكِنُ أَنْ نَرى بأنّ هناك بَعْض الأجسامِ التي تُشرقُ بالضوء المنعكس (كواكب)، وبَعْض الأجسام التي تُشرقُ بضوئِهم الخاص (نجوم). عرفنا فيما سبق كيف يولد أو يشكل النجم . أما الكوكب يُشكّلُ بعملية مختلفة: حيث أنّ الجزيئاتَ الصغيرةَ للغبار، التي تكون مَتْرُوكة بعد تشكيلِ النجمِ، تصطدم بعضها ببعض ثم تلتصق لتشكل مجموعاتِ أكبر . هذه المجموعاتِ تباعاً تصطدم لتشكيل مجموعات أكبر ، والعملية تستمرُّ حتى يستهلك أغلب الغبار . و النتيجة تكون جسم بارد نسبياً ، ليسَ حار أو ثقيل بما فيه الكفاية لِيُنتجَ ضوئه خاص به كما في النجوم.

لذا من أين يَجيء القزمُ البني إلى الصورة ؟ إذا ، لسبب ما ، أن يكون الغاز المتوفرُ لتشكيل نجم غير كافي ، ثمّ لنْ يَكُون الجسم المتكون قادر على زِيَادَة كتلته ودرجة حرارته بما فيه الكفاية لِكي تكُونا قادرة على إنتاج أو تَحَمُّل اندماج نووي للهيدروجين. وبالتالي فإنّ الجسمَ الناتجَ هو الذي يُعْنَى القزم البني.

إذا كانت كتلة النجم أقل من كتلة الشمس بكثير سوف يبقى النجم أسفل التتابع الرئيسي في حالة الاتزان الهيدروستاتيكي والانكماش التجاذبي وهذا النجم يلي –في الموقع – مسارات هاياشي. حيث التفاعلات النووية تتوقف عن الانكماش ولن تستطيع أن تصل إلى درجة حرارة عالية كافية لإشعال التفاعلات النووية حيث يستخدم وقوده الهيدروجيني ببطيء وكتلته تقترب من 1/12 أي تقريباً 0.08M☐ والتي تساوي 80 مرة من كتلة كوكب المشتري.

وهذه النجوم صغيرة ويمكنها أن تنتج الطاقة لفترة معينة قصيرة، ولكن لا تصبح حارة لتندمج البروتونات لكي تشكل الهليوم وهي تبعث وافراً من الإشعاع تحت الأحمر. لذا سميت بالأقزام البنية أو أقزام دون الأحمر (Infrared Dwarfs). ولقد تم رصد وهج من الأشعة السينية X - ray صادر من أحد الأجرام السماوية المسماة الأقزام البنية لمدة ساعتين متصلتين. ويعتبر الحصول على مثل هذا الوهج لهذه المدة دليلاً قاطعًا على وجود مجال مغناطيسي لمثل هذه الأجرام، كما سيساعد هذا الوهج في دراسة مصدر ذلك المجال المغناطيسي.

أيضاً النجوم ذات الكتلة الأقل من $0.08M_{\odot}$ أو التي تقع بين (1/100-1/12) والكتل الأقل ($M_{\odot}/100$) سوف تكون كواكب على سبيل المثال كوكب المشتري الذي له كتلة حوالي 0.001 مرة من كتلة الشمس.

ولذا تستغرق الأقزام البنية حياتها حوالي (200-300) بليون سنة (بينما عمر الكون 10 إلى 20 بليون سنة قد مضت).

أهمية الأقزام البنية : من المعروف ، أن أحد أهم المشاكل في علم الكوزمولوجيا و الفيزياء فلكية الآن مشكلةُ الكتلة المفقودة . من الأرصاد الفلكية والدراسات النظرية يمكنا فقط أن نميز أو نعرف حول 10 % من كتلةِ الكون. لذا أين ألـ 90 % الآخرون ؟ إحدى النظريات تربط بين اختفاء المادة والأقزام البنية ، لذا اكتشاف الأعداد الواسعة للأقزام البنية سَيعطي نتائج عظيمة لعلم الكوزمولوجيا.

2-3-4 معادلة الحالةِ

في نجمِ التتابع الرئيسي- نصف القطر الكبير واللب غير منحل – لذا يُمْكِنُ أنْ يُتحمّل لفترة زمنية طويلة الضغطِ الحراري المتولد بسبب ردودِ أفعال نووية حراريةِ مستمرةِ. ومن هذا التعريف تفتقرُ الأقزامُ البنيةِ إلى مثل هذا الطاقة الكبيرة التي تُحدّدُ مصدر وتَشتقُّ استقرارَهم مِنْ الضغط الناتج من تحلل الإلكتروناتَ. الفَهْم الدقيقَ جداً للأقزام البنيةِ يُمْكِنُ أنْ يُحْصَلَ عليه باعتبار الغاز المكون للنجم متعدد الطرز $n=3/2$، كالتّالي: الضغط الكلي يعبر عنه ، بمعرفة الكثافة الجماعية (الكتلية) ρ و الوزن الجزيئي المتوسط لكلّ إلكترون μ_e (تساوي 1.15 نسبة الوفرة الكونية للعناصر)و الكتلة الذرّية المتوسطة $\bar{A}$ (تساوي 1.24 نسبة الوفرة الكونية للعناصر) ، تقريباً بـ

$$P=P_F + P_{th,ion} + P_{th,el} \qquad (4\text{-}78)$$

حيث : P_F هي ضغط فرمي للغاز المثالي غير النسبي ودرجة حرارة الإلكترونات صفر ويعطى بـ

$$P_F = 1\times10^{13} (\rho/\mu_e)^{5/3} \ \text{dyn cm}^{-3} \qquad (4\text{-}79)$$

$P_{th,ion}$ ضغط الأنوية الموجودة في الغاز المثالي وتعطى بـ

$$P_{th,ion}= \mu_e\psi P_F/\bar{A} \qquad (4\text{-}80)$$

و أخيراً $P_{th,el}$ هي تصحيح درجةِ الحرارة المحدودِ لضغطِ الإلكترونَ وتعطى بـ

$P_{th,el}= = \mu_e^{2/3} \psi^2 P_F/(1+\psi)$ (4-81)

حيث ψ هي معامل الانحلال في درجة الحرارة المطلقة T وتساوي

$\Psi = 8x10^{-6}T(\mu_{e/} \rho)^{2/3}$ (4-82)

ومن دراسة الأقزام البنية أصبح من المعقولُ افتِراض تلك الأقزامِ قريبون من حالـة كاتم الحرارة adiabatic في كافة أنحاء تركيبهم الداخلي ولأغلب فترة عمرهم. ومِن قِبيل الصدفة المحظوظة تحت شروطِ كتمان الحرارة ، العلاقة بين درجة الحرارة T و الكثافة ρ تقريباً هي $T\propto\rho^{2/3}$. في درجاتِ الحرارة العاليةِ هذا سلوكُ غازِ أحادي الذرةِ مثالي ، نفس هذا السلوكِ يَنطبقُ أيضاً تقريباً على بلازما كولومب الكثيفة.وللبساطةِ، بحَذْف الانحراف مِنْ وحدةِ قِيَمِ μ_e و $\bar{A}$ في الشروطِ الحراريةِ وبالتالي يُمْكِنُ أَنْ نكتب

$P\approx 10^{13} \rho^{5/3} [1+ \psi +(\psi^2/(1+ \psi))] \mu_e^{-5/3}$ dyne cm^{-2} (4-83)

حيث ψ . ثابت لمل قزم بني كاتم للحرارة. وفي حالة الغاز متعدد الطرز نجد أن نصفِ القطر يُعطى بـ

$R=R_o[1+ \psi +(\psi^2/(1+ \psi))]$ (4-84)

حيث R_o نصف القطر عند درجة الحرارة الصفرية و تعطى بمعرفة كتلة القزم البني M وكتلة الشمس $M_\odot$ بـ

$R_o=2.8x10^9(M_\odot/M)^{1/3} \mu_e^{-5/3}$ cm (4-85)

علاوة على ذلك عند استخدام n=3/2 وعندما تكون كثافة مركز القزم البني ستة أضعاف متوسط الكثافة الكلية وبمعرفة درجة حرارة المركز T_c يمكن أن نكتب

$\psi =1.9x10^{-9}T_c(M_\odot/M)^{4/3}(R/R_o)^2 \mu_e^{2/3}$ (4-86)

إذا نَعتبرُ جسمَ ذو كتلةٍ معينه يَفْقدُ طاقة – مباشرة بدايةِ في حالة غيرِ الانحلال $\psi>>1$ – وبالتالي المعادلات من (4-84) إلى (4-86) تعرف نصف القطر ودرجة الحرارة المركزية كدالة في نقصان ψ. وبتفاضل المعادلة (4-84) ووضع $dT_c/dR=0.0$ نجد أن T_c تظهر بشدة دالة في R عند $\psi\approx0.55$ و $R/R_o\approx1.9$. وعند $\mu e=1.15$ هذه درجة الحرارة المركزية العظمى تصبح

$T_{cm}=8.1x10^7(M_\odot/M)^{4/3}$ (4-87)

إذا نُخمّنُ درجة الحرارة الحرجة لردّ الفعل التفاعل النووي الحراري هي $3x10^6$ K و بالتالي الكتلة الدنيا للسلسلةِ التتابع الرئيسي تكون تقريباً 0.084 كتلة الشمس.

من المعادلات (4-53) إلى (4-85) بفرض أن $\mu_{e=1.15}$ و n=3/2 يمكن استنتاج الكثافة المركزية والضغط المركزي كالتالي :

$$\rho_c = (4.7x10^6\ g/cm^3)\ (M/M_\odot)^2 (R_o/R)^3 \qquad (4\text{-}88)$$

$$P_c \approx (1x10^{24}\ dyne/cm^2)\ (M/M_\odot)^{10/3} (R_o/R)^4 \qquad (4\text{-}89)$$

في حالة معظم الأقزام البنية كبيرة الكتلة ($M\approx0.08M_\odot$) الكثافة المركزية تساوي $3x10^4\ g\ cm^{-3}$ والضغط المركزي يساوي $2.6x10^{20}$ داين/سم^2 عند التحلل الكلي ، أي أن $R=R_o$. وهذه القيم تكون $4.4x10^3$ جم/سم^3 و $1.7x10^{19}$ داين/سم^2 عند أعلى درجة حرارة مركزية وعند $R=1.9R_o$. لهذه الأقزام ذات الكتل الكبيرة فإنها تأخذ وقت كبير يثبت الانحلال العالي ، ولذلك لبد من أخذ في الاعتبار عند رصد تلك النجوم عوامل التصحيح في حالة $R/R_o\neq1$.

عدة تعديلات هامة لابد من إضافتها إلى المعادلات (4-78) إلى (4-81) في حالة الأقزام صغيرة الكتلة أو منخفضة درجة الحرارة. وأهم معظم هذه التعديلات هي لضغط كولومب ، الذي ينتج من طاقة الكهربية الساكنة للأنوية التي تنغمس في بحر من الإلكترونات ، ولتغير الضغط الناتج من تخفيض طاقة النفور بين الإلكترونات. وهذه التعديلات هي

$$P_{coul} \approx -4x10^{12}(\rho/\mu_e)^{4/3}\ \acute{z}^{5/3} f_c \qquad (4\text{-}90)$$

$$P_{exch} \approx -24x10^{12}(\rho/\mu_e)^{4/3}\ \acute{z}^{5/3} f_{ex} \qquad (4\text{-}91)$$

$$f_c \approx [\ \Gamma/(1+\Gamma)]^{1/2} \qquad (4\text{-}92)$$

$$f_{ex} \approx 1/(1+\psi) \qquad (4\text{-}93)$$

$$\Gamma \equiv 2.3x10^5(\rho/\mu_e)^{1/3}\ \acute{z}^{5/3}/T \qquad (4\text{-}94)$$

حيث $\acute{z}$ متوسط التغير النووي و Γ عامل البلازما وتكون قيمة أقل بكثير من الواحد في مناطق دبي-هكيل وأكثر بكثير من الواحد في حالة الترابط القوي للبلازما وتكون أكثر من أو تساوي 1.8 في حالة وجود شبكة صلبة solid lattice .

المعادلات (4-92) و (4-93) تشبه المعادلة (4-81) هي صِيَغ زيادةِ تَرْبطُ مستوى عالي مضبوطَ ولحدودَ درجةِ الحرارة المنخفضةِ. يَدْخلُ بارامترُ البلازما أيضاً إلى التخميناتِ أكثر دقةَ لـ $P_{th,ion}$ ،لكن هذا التطوّر (التخمين) نادر و ضروري ما لم يَتطلّعُ واحد إلى الدقةِ التي

$$R_o = 2.2x10^9 (M_\odot/M)^{1/3} [1+y^{-1/2}]^{-4/3} \quad (4-95)$$

$$y=M/0.0032\ M_\odot \quad (4-96)$$

والتي تعطي أكبر قيمة لـ $R_o \approx 6x10^9$ سم عند $y=1$.

في الأقزام البنية العملاقة جزء من الكتلة لا يمكن أن يوصف بالمعادلات السابقة. وهذا الجزء هو الطبقات الخارجية من الغلاف النجمي للقزم والتي تتكون أساساً من جزئ الهيدروجين. في هذه المناطق معادلة الحالة تختلف تماماً . وأيضاً توجد منطقة تكسير الجزيئات تقع بين اللب الذي يتميز ببلازما كولومب والتي تكون فيه معادلات الديناميكا الحرارية تتصرف بطريقة شاذة ، والمنطقة الخارجية التي تتكون من جزئ الهيدروجين.

4-3-3 الخواص الحرارية

طبيعة وتوزيع الأنوية في لب القزم هي اللاعب الرئيسي في الخواص الحرارية ، على الرغم أنها غير هامة في العلاقة بين الضغط والكثافة. وهذا ممكن لآن المساهمة الحرارية إلى الطاقة الحرة الكلية صغيرة أو تقترب من طاقة الغاز المثالي. الحالة الحرارية الفعلية داخل القزم البني هي : درجة الحرارة تساوي 10^5 كلفن والكثافة تتراوح من 10^2 إلى 10^3جرام/سم^3 ، وهذه الحالة تماثل بلازما كولومب. مثلاً إذا كان $\acute{z}=1.08$ وبالتالي $\Gamma \approx 2.2/\rho^{1/3}\psi$ ، وهذا يعني ففي حالة $\rho = 10^3$ و $\psi = 0.2$ (هذه هي الشروط الفعلية لقزم عمرة بليون سنة وكتلة تقريباً 0.05 كتلة الشمس) نجد أن $\Gamma \approx 1$ وهذه القيمة تقترب كلياً من منطقة بلازما كولومب. في هذه المنطقة تعتبر الأنوية كالسوائل وليس الغازات وتكون درجة الحرارة بعيدة جداً من منطقة التجمد عند $\Gamma \approx 180\text{-}190$.

يوجد عملان من المهم دراستهم هنا وهما الحرارة النوعية (c_v الحرارة النوعية عند ثبوت الحجم و c_p الحرارة النوعية عند ثبوت الضغط) وعامل جروسن (Grüeisen) $\gamma=(\partial \ln T/\partial \ln\rho)_s$. في حالة عدم التحلل للأيونات الكلية fully ionized للهيدروجين تكون $c_v = 3k_B/m_p$ – حيث k_B ثابت بولتزمان و m_p كتلة البروتون. أما في حالة التحلل الكلي تكون $c_v = 3k_B/2m_p$ عند $\psi=1$ ، لآن مساهمة الأيونات فقط هي المهمة في الطاقة الحرارية. على أية حال ، الإرتباط التقدمّي لبلازما كولومب نتيجة زيادة Γ تجعل c_v تزداد على الرغم من القيمة الصغرى لـ ψ. في الواقع بلازما كولومب في حدود درجات الحرارة المنخفضة (عند نقطة التجمد أو قريب منها) تصل إلى ما يسمى بحدود دولونج-بيتت Petit–Dulong للحرارة النوعية $c_v=3k_B/\mathbf{m_p}$ ، التي تصادف أنها تماماً مثل قيمة حدود درجة الحرارة العالية.

وعامل جروسن γ يساوي 2/3 في حالة الغاز المثالي ، أما في حالة بلازما كولومب الكثيفة فإنها تساوي تقريباً 0.6. وعموماً يعبر عن هذا المعامل دائماً بتعبير الأنتروبي entropy أو عدم الانتظام ، ويرمز له بـ S. وفي حالة الأقزام البنية كاتمة الحرارة تكون قيمة S في اللب هي قيمتها في الغلاف النجمي. ويمكن حسابها بدقة في كلا الحالتين حتى في الظروف الشاذة التي تنشأ من عملية التكسير والتأين. وفي حالة تكون اللب من بلازما كولومب فإن S تعطى بـ

$$S_{int} = 2.2 \ln(T/\rho^{0.63}) - 11.6 \qquad (4\text{-}97)$$

وحيث أن الجزء الخارجي من الغلاف النجمي يتكون أساساً من جزئ الهيدروجين وهو بعيد جداً عن عملية كتمان الحرارة وتكون عملية الانحلال ضرورية ، فعند درجة حرارة $T\leq 2000K$ وتكون حركة جزئ الهيدروجين دورانية وانتقالية وليست اهتزازية فإن

$$S_{atom} \approx 1.27 \ln(T/\rho^{0.43}) - 3.0 \qquad (4\text{-}98)$$

انتقال الطاقة

في نجوم التتابع الرئيسي صغيرة الكتلة تنتقل الحرارة عن طريق الحمل ، لأن انتقال الطاقة بواسطة الإشعاع تكون صغيرة جداً بالنسبة للنورانية أو الضياء. وهذه الخاصية يمكن تطبقها في الأقزام البنية ، على الرغم من أن عتامة جزئ الهيدروجين صغيرة والتوصلية الحرارية للهيدروجين المعدني عالية جداً. في حالة الأقزام البنية كاتمة الحارة فإن نقل الحرارة بواسطة الإشعاع تعطى بـ

$F_{rad} = (4/3k\rho)(d(\sigma T^4)/dr)$ (4-99)

حيث σ ثابت ستيفان- بولتزمان و k متوسط عتامة روزلاند. في المنطقة القرية من سطح القزم حيث الهيدروجين هو المكون الأساسي ($T\propto\rho^{0.42}$) و ميل الكاظم ثابتُ تقريباً ($-g/C_p$ و g تسارع الجاذبية) ، نجد أن $F_{rad} \propto\rho^{0.26}/k$. في حالة ثبات k نجد أن نقل الحرارة بواسطة الإشعاع تزداد مع عمق القزم.

وتدفق الحرارة بواسطة الحمل يعطى بـ

$F_{conv} = 0.1\beta\rho\alpha^2\varepsilon^{3/2}C_pV_sT$ (4-100)

حيث β هي حاصل ضرب معامل التمدد الحراري في درجة الحرارة للغاز المثالي و V_s هي سرعة الصوت في الوسط و α هي نسبة الضغط إلى الطول في تدريج الارتفاع و ε هي الكمية الجزئية التي فيها يَتجاوزُ مقدارَ ميلِ (أو انحدار) درجةِ الحرارة الفعلي مقدار ميلِ درجةِ حرارة الكاظم.

من القانون الأول للديناميكا الحرارية وفي حالة الاتزان الهيدروستاتيكي ، نجد أن النورانية أو الضياء مع إهمال الضغط الحراري للإلكترونات يعطى بـ

$L \approx (3.5Mk_BT_{cm}R_o/R^3m_p)(R+R_o)(dR/dt)$ (4-101)

في حالة الوفرة الكونية للعناصر و الغاز متعدد الطرز $n=2.3$ و T_{cm} تعطى بالمعادلة (4-87) والمعادلة (4-101) نجد أن العلاقة بين درجة الحرارة الفعالة ودرجة الحرارة الداخلية للقزم هي

$T_e = 3.8x10^{-6}T_c^{1.22}(M/M_\odot)^{-1.05}(R/R_o)^{1.7}(k/10^{-2})$ (4-102)

مع العلم أن $L=4\pi R^2\sigma T_e^4$ ، فهذا يجعلنا أن نحول المعادلة (4-101) إلى معادلة تفاضلية تتغير مع زمن تطور درجة الحرارة الفعالة T_e .

وعلى الرغم من أنه لا يوجد حَلّ تحليلي ممكن عند $R\rightarrow R_o$ و $R^{-1}dR/dt \approx 0.2T_{cm}^{-1}dT_c/dt$ لذلك يمكن التعبير عن درجة الحرارة الفعالة كدالة في الكتلة والزمن والعلاقة بين نورانية القزم البني ونورانية الشمس كما يلي :

$T_e \approx (1420K)(5x10^9\ year/t)^{5/16}(M/M_\odot)^{0.79}(k/10^{-2})^{0.075}$ (4-103)

$L/L_\odot \approx 1.5x10^{-5}(5x10^9\ year/t)^{5/4}(M/0.08M_\odot)^{5/2}(k/10^{-2})^{0.3}$ (4-104)

من هذه المعادلات نجد أن :

1- القزم البني لا يمكن رصده عندما يكون عمرة أصغر 1-10% من عمر المجرة وهذا لأن إشعاعه يكون قريباً من الأشعة تحت الحمراء.
2- النورانية تعتمد على كتلة القزم على التتابع الرئيسي.
3- الاعتماد على العتامة قليل في حساب النورانية ودرجة الحرارة الفعالة.
4- على الرغم من أن الأقزام البنية صغيرة العمر لها ضياء أكبر من صغيرة الكتلة التي توجد على التتابع الرئيسي ، نجد أن الأقزام صغيرة العمر لا يمكن تميزها وفقط التي تتضح للراصد هي التي تنفصل عن التتابع الرئيسي.

4-4 تطور الحشود النجمية

إن عمر الإنسان لا يمكنه أن يوفر دراسة كاملة عن تطور النجوم بسبب ما جبل عليه من الخلقة – العمر القصير بالنسبة لمقابيس لعمر الكون- ولكي تتبع تطور نجماً ما لابد من دراسة جميع مراحل حياته الذي يصعب التعرف عليها. لذلك أن دراسة تطور الحشود النجمية يعمق فهم نشوء النجوم وتطورها.

لذا يفترض حشد متكون من نجوم تكونت في نفس السحابة من المادة لوسط ما بين النجوم وفي نفس المكان والزمان التي لها تركيب كيميائي متجانس ولكنها مختلفة الكتل.

لذلك يمكن أن نستدل لمعانها وأنصاف القطر لها من قانون ستيفان الذي ينص على أن اللمعان يتناسب طردياً مع مساحة سطح الجسم والقوى الرابعة لدرجة الحرارة المؤثرة على سطحه $L = 4\pi r^2 T_e^4$ لذلك يمكن حساب درجة الحرارة لكل النجوم ورسمها على المخطط هيرتز- راسل.

لذا فإن النجوم ذات الكتلة الضخمة وذات حرارة عالية جداً ولمعان كبير تبقى عند الزاوية العليا من اليسار ويكون تطورها سريع على التتابع الرئيسي التي سوف تكمل مراحل تطورها حتى تصبح عملاق أحمر أو فوق العملاق الحمراء. بينما النجوم ذات الكتلة المنخفضة في الحشد (القزمة العادية لا القزمة البيضاء) تكون باردة وأقل لمعان التي يمكن أن يحدث لها الانكماش التجاذبي قبل وصولها التتابع الرئيسي (pre-Main Sequence) والتي تبقى في الجزء السفلي الأيمن. لذلك التتابع الرئيسي هو الموضع للنجوم التي تمثل تركيب كيميائي متجانس وذات كتل مختلفة.

لذلك فسر داينش ب. سترومجرن أن النجوم المرصودة في المجرة تبقى غالبيتها على التتابع الرئيسي التي يكون تركيبها متجانس كيميائياً ومماثلة للشمس.

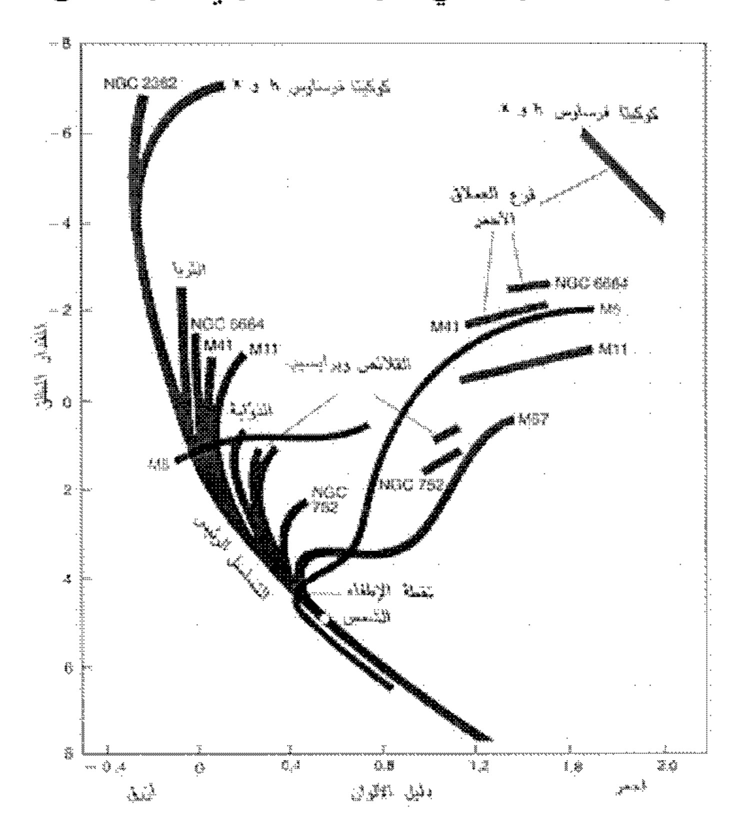
وبرسم الكتل لنجوم الحشد الافتراضي مقابل لمعانها نجد أن النقاط تمتد على طول الخط القطري (العلاقة بين الكتلة واللمعان) حيث تعتبر متماثلة في التركيب الكيميائي. بعض النجوم تأخذ هذه العلاقة ولكن ليست من نجوم التتابع الرئيسي إنما هو ظرف وقع مصادفة.

إذن الفائدة الرئيسية لاستخدام الحشود النجمية بدلاً من النجوم الفردية هي فحص النظرية لنشوء النجوم وتطورها لكثير من نجوم الحشد عند المسافة نفسها. ويمكن أن نرى الفروق بين أنواع الحشود النجمية التي هي الحشد الكروي والحشد المجري والمترافقات كما مبين في الجدول التالي

خصائص الحشود النجمية.

	الحشود الكروية	***الحشود المفتوحة***	***المترافقات***
العدد المعروف في المجرة	125	~ 1000	70
الموقع في المجرة	**الهالة والانتفاخ النووي**	**القرص (والأذرع الحلزونية)**	الأذرع الحلزونية
القطر(pc)	100 - 20	<10	200 - 30
الكتلة (الكتلة الشمسية)	$10^4 - 10^5$	$10^2 - 10^3$	$10^2 - 10^3$ ؟
عدد النجوم	$10^4 - 10^5$	$50 - 10^3$	100 - 10 ؟
لون لمعان النجوم	أحمر	أحمر أو أزرق	أزرق
اللمعان الكلي للحشد (Ls)	$10^4 - 10^6$	$10^2 - 10^6$	$10^4 - 10^7$
كثافة النجوم (Ms/pc^3)	1000 - 0.5	10 - 0.1	< 0.01
أمثلة	حشد الجاثي (M1)	القلائص ، الثريا	Z فرساوس ،الجبار

أيضاً تبين مخططات هيرتز-راسل توزيع النجوم في المجموعات النجمية حسب اللون والقدر حيث يبين الاختلاف بين المجموعات المفتوحة في القرص المجري تكون على التتابع الرئيسي، والمجموعات الكروية التي تنتمي إلى الهالة. حيث تتساوى أعمار جميع النجوم في المجموعة الواحدة. لذا هذا المخطط يظهر نشوء النجوم وتطورها. أما النجوم الضخمة المتألقة يكون تطورها أسرع ما



ومع تقدم المجموعة في السن فإن نقطة الانطفاء تتحرك نحو الأسفل. وتختلف أعمار المجموعات المفتوحة (النوع الأول من السكان).

وقد تم تشكل واحدة من أحدثها سناً (NGC 2362) قبل مليون سنة تقريباً. ويعتقد بأن جميع المجموعات الكروية (النوع الثاني من السكان) بما فيها M5 قد تم تشكلها قبل ما لا يقل عن 13 مليون سنة الشكل (4-2).

الشكل(4-2) يبين مسار الحشود النجمية على التتابع الرئيسي

5-4 النجوم عمالقة الكتلة

في النجوم عمالقة الكتلة بفرض أن قيمة طاقة الوضع للجاذبية تقارن بطاقة الكتلة الثابتة rest mass وبالتالي

$$\Omega = 3GM^2/2R \cong Mc^2 \qquad (4\text{-}105)$$

حيث c سرعة الضوء. أي أن نصف القطر للنجم هو

$$R=3GM^2/c^2 = 10^{28}M \qquad (4\text{-}106)$$

وتكون متوسط الكثافة

$$\bar{\rho} = 3M/4\pi R^3 = 4.5\times10^{16}(M\odot/M) \qquad (4\text{-}107)$$

مثال : بفرض أن نجم عملاق كتلة $M=10^8M\odot$ و نصف قطرة $R=314R\odot$ و كثافة المتوسطة تساوي $4.5gcm^{-3}$ ، نجد أن الانكماش التجاذبي الذاتي تقريباً يساوي

$\rho GM/r^2 = 3GM^2/4\pi R^5 = 3000$ وحدة شمسية

أما في نجوم التتابع الرئيسي الثقيلة ، حيث أن $M=100M\odot$ و $R=100R\odot$ و الكثافة المتوسطة تساوي $10^{-4}gcm^{-2}$ ، فإن قيمة الانكماش التجاذبي الذاتي تقريباً يساوي 10^{-10} .

وبالتالي ففي النجوم عملاقة الكتلة نجد أن طاقة جاذبية الوضع تصبح تقريباً مساوية إلى طاقة الكتلة الثابتة Mc^2 ويكون الانكماش التجاذبي الذاتي قوي جداً إلى حد أنه يقيد المادة

$$dP / dr = - \rho G_{eff} Mr / r^2 \qquad (4\text{-}108)$$

حيث G_{eff} ثابت الجاذبية الفعال ويساوي

$$G_{eff} = \{G(1+P/\rho C^2) [1+4\pi \alpha(r)P r^3/ Mr C^2]\} / (1- 2GMr /rC^2) \qquad (4\text{-}109)$$

حيث $\alpha(r) = P/\bar{P}$ و $\bar{P}$ هي متوسط الضغط خلال المسافة r.

إن المسافة والاتجاه في هذه الأجسام تتغير بفعل مجال الجاذبية المؤثرة على مسارات الضوء، فعندما تكون الكتلة صغيرة جداً فإن مسار الضوء يصبح خط مستقيم أي الكتلة تؤل إلى الصفر ($M\rightarrow o$). وعندما تكون الكتلة أكبر من $2rc^2/3G$ المعطى بالمعادلة (4-106) وبذلك تصبح طاقة الفوتون كبيرة وبالتالي ينحني مسار الضوء. وعندما $M/r = 2c^2/3G$، فإن نصف قطر انحناء مسار الضوء هو r ولذلك انحناء السطح بالنسبة إلى مسار الضوء صفر. وتصبح قيمة r مالا نهاية ، ولذلك لا يوجد حجم وتتحرك الفوتونات تحت تأثير مجال الجاذبية مثل الكواكب حول الشمس ، ولا يمكن أن تشع ضوء وبذلك يتحول الجسم إلى ثقب أسود في الفضاء.ويصبح قيمة ثابت الجاذبية الفعال G_{eff} مالا نهاية.

وإذا كانت سرعة حركة الجسيمات عالية تقترب من سرعة الضوء فإن التغير الذي حدث في معادلة الاتزان الهيدروستاتيكي (4-108) لابد وأن يحدث في معادلة طاقة الجاذبية.
ففي حالة $2GM_r < 1$ فإن

$$T \square mC^2/3k \qquad (4\text{-}110)$$

و تصبح طاقة الجاذبية النسبية

$$\Omega (rel) = \Omega + (8\pi G /C^2)\int_0^R Mr\, P\, r dr + (4\pi G^2/C^2) \int_0^R M_r^2 \rho\, dr \qquad (4\text{-}111)$$

حيث Ω هي طاقة الوضع الجاذبية المشتركة بفعل التكامل من $r = 0$ إلى $r = R$ لتجاذب الجاذبية المشتركة. وتكون الطاقة الكلية للجسم الفائق الضخامة عندما GM / R تقترب من سرعة الضوء c^2 في حالة الاتزان الهيدروستاتيكي هي

$$E/M_C^2 = (3f/2)(GM/RC^2) + (5.1+9.2f)(GM/RC^2)^2 + E(dyn)/MC^2 \qquad (4\text{-}112)$$

حيث f هي التسارع بوحدات قوة الجاذبية و $E(dyn)$ هي طاقة الحركات الديناميكية التي تفقد على شكل حرارة داخل النجم. الشكل (4-3) يبين الحالة النسبية التي ينكمش بها الجسم الفائق الضخامة مع ارتفاع في درجة الحرارة المركزية. حيث الطاقة المنطلقة من التفاعلات النووية أقل بكثير من الطاقة المتكافئة للكتلة الكلية. وعندما ينهار النجم فإن التسارع يكون نحو الداخل ويكون السقوط الحر عند $f = -1$ والاتزان الهيدروستاتيكي $f = 0$. وأما الحد الثاني من المعادلة (4-112) يتلاشى التسارع عندما يكون المعامل $f = -0.55$.

الشكل (4-3): يعتبر الطاقة الكلية كدالة لدرجة الحرارة المركزية لأجسام ذات كتلة فائقة مستقرة.

إذن تستطيع الطاقة المنبعثة في القلب المنهار الانتقال إلى الغلاف وربما ينفجر الغلاف بعد ذلك. وعندما تصبح سرعة الانهيار تؤل إلى سرعة الضوء $\upsilon(collapse) \rightarrow c$ و $2GM/RC^2 \rightarrow 1$ فإن زمن الانكماش يؤل إلى

$$t(collapse) \sim R/C \sim 2GM/C^3 \qquad (4\text{-}113)$$

وعندما تكون كتلة السحابة $M = 10^8\ M\odot$ فإن زمن الانهيار يكون $10^3 s$، و هذه النتيجة تكون لأجسام تعرف بالكوازرات (quasars). ويكون معان الجسم (النجم) الغازي متعدد الطرز بمعامل $n = 3$ قبل الانهيار هو

$$L = 4\pi C\ [GM(1-\beta)/\acute{K}\acute{\eta}] \qquad (4\text{-}114)$$

حيث $\acute{K}\acute{\eta} = (L_r / M_r) / (L/M) \sim unity$. وبما أن الصفر $\rightarrow \beta$ نحصل على

$$L/L\odot \approx 10^4 (M/M\odot) \qquad (4\text{-}115)$$

وبالتالي يكون الجسم الفائق الضخامة حوالي عشرة آلاف مرة بوحدة الكتلة أكثر لمعان من المتوسط لنجم قزم عادي مثل الشمس أو نجوم المجرة العادية.

9-5 الثقوب السوداء

بعد ما انتهى علماء الفلك من رصد وفهم آلية النجوم النيترونية، وجهوا نظرهم إلى البحث عن أجسام أكثر كثافة. ولما كانت كثافة هذا الجسم أكثر من النجم النيتروني الذي تقارب سرعته سرعة الضوء وتساوي 000 200 كم/ث، سوف تكون لهذا الجسم لمادته والطاقة منه غير قادرة على الإفلات من جذبه الثقالي الهائل.

لقد التقط في البداية بعض العلماء إشارات كهر ومغناطيسية مسجلة بالأشعة السينية نحو منطقة معينه من السماء، وعندما وجهت التلسكوبات المتطورة آنذاك نحو ذلك المصدر لم يستطيعوا مشاهدة أي جسم كوني لمصدر تلك الموجات. لذلك أهتم العلماء بمثل هذه المنطقة حتى سميت بالثقوب (الفجوات) السوداء Black Holes التي هي دلالة على وجود حافة لهذه المناطق.

كان معلوما في أواخر القرن الثامن عشر الميلادي الاستنتاج الذي ظهرت به نظرية نيوتن للجاذبية مفاده بأن نسبة الكتلة M لنصف قطر لجسم كروي معين R هي التي تحدد السرعة الحرجة υ_{esc} أو سرعة الهروب للانطلاق جسم من تلك الكتلة ،

$$(½)\upsilon_{esc}^2 = GM/R \qquad (5\text{-}51)$$

أي لا تعتمد على كتلة الجسم المنطلق. وهذه السرعة تفوق سرعة الضوء إذا كان $R<R_s$ ، حيث R_s هو نصف قطر تشفازرشيلد للكتلة M ويساوي

$$R_s = 2GM/c^2 \qquad (5\text{-}52)$$

ومن هذه النظرية توجد عدة أنواع من الثقوب السوداء : (أ) ثقب أسود ناتج من انهيار نجم ذو نصف قطر $R_s(M) \approx 3km$ ، (ب) ثقب أسود ناتج من انهيار حشد نجمي ذو نصف قطر $R_s(10^9 M) \approx 20$ وحدة فلكية ، (ج) ثقب أسود افتراضي حيث $R_s(10^{15}\ gm) \approx 10^{13}\ cm$.

وبما أن الطاقة الكهرومغناطيسية لا يمكنها الهروب من هذا الجسم فان هذا يعني أن طاقة الوضع الجاذبية (التثاقلي) عندما تقارن مع الكتلة المتبقية للجسم هي

$$GM/R \sim MC=2/3 \qquad (5\text{-}52)$$

إن فكرة الثقوب السوداء هي أن تعمل قوة الجاذبية على ارتداد الأشعة التي يصدرها النجم وترغمها بالرجوع إليه مرة ثانية، وبالتالي لا يمكن رؤية تلك الأشعة، وبالتالي لا يمكن رؤية الثقب الأسود ، هذا ما ينطبق مع النظرية النيوتونية.

أي أنـه إذا كانـت الكتلـة المتبقيـة بعـد انفجـار الـنجم أكبـر مـن حـد شندراسـكر – $M_c=(2/\mu_e)^2 1.458M\odot$ - بمقدار $(2\text{-}3M\odot)$ وفي حالة انهيار تجاذبي ، فإنها سوف تكون سطح مغلق من خلالها الإشارات للموجات الكهرومغناطسية لا يمكنها الهروب ، وهنا يتكون الثقب الأسود. في هذه الحالـة μ_e هي متوسط الوزن الجزيئ للإلكترونات وتساوي 2 بالنسبة لغاز الهيدروجين. وحيث أن كتلة الشمس تساوي $2x10^{33}gm$ فإن نصف قطر الجسم المتكون لابد وأن يكون أكبر من القطر الحرج لشندراسكر –$R_c=3.4x10^5(M/M\odot)$– في حالة غاز متعدد الطرز فيه $n=3$ و نصف قطرة يساوي R_s . وتكون أيضاً درجة الحرارة أكبر من درجة الحرارة الحرجة – $T_c=1.7x10^{13}(M\odot/M)\ ^oK$. وفي حالة دوران النجم فإن قيمة كلٍ من نصف القطر الحرج ودرجة الحرارة الحرجة تتغير حيث يأخذ في الاعتبار قيمة كل من السرعة الزاوية ω والزخم الزاوي $I=k^2Mr\omega$ كما يلي :

$$R_c = 1.5x10^6 (f/k^2)(M/M\odot)(GM/R^3\omega^2) \quad cm \qquad (5\text{-}53)$$

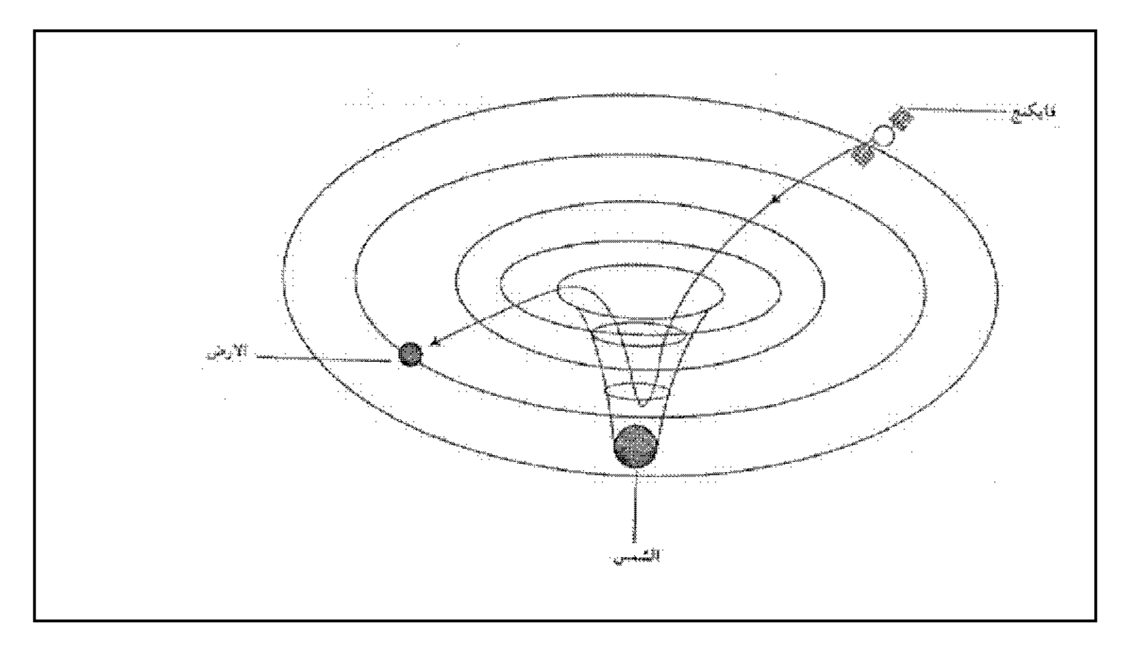
$$T_c = 3.9x10^{12}(M\odot/M)^{1/2}(R^3\omega^2/GM) \quad ^oK \qquad (5\text{-}54)$$

حيث $k^2 = 0.755$ في حالة ω الصغيرة و $f=(0.0989/k^2)(cI/GM^2)^2$

وتصل عملية انهيار النجم إلى نقطة مفردة (غير معرفة) singularity في الزمن عندما يكون

$$\tau = (3\pi/32G\rho_o)^{1/2} \approx GM/c^3 \approx 10^5(M/M\odot) \quad sec \qquad (5\text{-}55)$$

حيث ρ_o هي كثافة النجم قبل الانهيار ونصف القطر هو R_s . أي أن الراصد يرصد النورانية تقل لوغارتمي مع ثبوت الزمن τ ، مع أن الفوتونات تصل إلى الراصد بزيادة لوغارتمية مع الانحراف نحو الأحمر في نفس الوقت. وبالتالي سوف يرصد النجم المنهار في زمن لا نهائي وانحراف نحو الأحمر لا نهائي ويستمر نصف القطر يساوي R_s. وعند الأخذ في الاعتبار الدوران والمجال المغناطيسي في معادلات نيوتن التي تصف انهيار النجم ، سوف نجد أن طاقة الجاذبية تتحول إلى طاقة الدوران والطاقة المغناطيسية ، التي تؤدي إلى تطوين نفورتين double jet من مادة النجم تشابه التي ترصد من مصادر الأشعة الراديوية القوية.



الشكل (5-9): يبين الإشارة الراديوية منطلقة من
المركبة باتجاه الأرض، وهي في طريقها انحنى
مسارها نحو الشمس.

ومعنى ذلك؛ عند وصول الفوتون مسافة معينة من النجم يفقد طاقته مقابل مجال الجاذبية، بحيث تنحني المسارات الضوئية فيه، وبالتالي يعجز سطح الجسم عن إصدار شعاع، ويكون معزول عن محيطه الخارجي، وبالتالي أي جسم يدخل فيه لا يمكن الهروب منه. نرى مثل ذلك في الشمس،

عندما أرسلت مركبة فايكنج إشارة

راديوية إلى الأرض وفي طريقها إليها قد سارت هذه الإشارة مسار منحني نحو الشمس، بحيث وصلت متأخرة عن الزمن المتوقع لها الشكل(5-9). وبسبب قوة الجذب الثقالي الهائل للثقب الأسود فانه حتى الضوء لا يمكنه الخروج منه والذي تساوي سرعته300 ألف كم/ث.

وبفرض أن M الكتلة الكلية الثقب الأسود وأن سرعة الزاوية ω وعزمه الزاوي l والوضعية الكهرومغناطيسية φ وشحنته Q وتوتر السطح الفعلي T والمساحة A ، فان علاقة الطاقة له تكون

$$M = 2TA + 2\,\omega\, l + \varphi Q \qquad (5\text{-}56)$$

حيث أقصى عزم زاوي للثقب الأسود يعطى بـ $l_{max} = GM^2/c$. وإذا زاد العزم الزاوي عن هذه القيمة ، سوف تنتهي ظاهرة أفق الحدث وتظهر نقطة فريدة (غير معينة).

لذلك دراستنا لتطوير النجوم ذات الكتلة العالية إلى حالة ما بعد النجوم النيوترونية تأكد على وجود ثقوب سوداء. كذلك النقص الملحوظ في كتلة الكون المرئي. أن أول من تحدث عن إمكانية وجود هذه الثقوب السوداء العالم الفلكي والرياضيات الفرنسي بيير لابلاس عام 1798م –باستخدام فيزياء نيوتن – وتصور أن كثافة بعض الأجسام قد تزداد بشكل تكون سرعة الإفلات إلى قيم أعلى من سرعة الضوء. حتى ظهرت نظرية آينشتاين – التي تتفق معها في الجوهر – التي تعطي المواصفات المفصلة للثقب الأسود وتأكيدا على وجوده.

لذا تدل الحسابات النسبية على أن الثقوب السوداء التي تتخلف اثر انفجار المتجددات الجبارة التي تتجاوز كتلته ثلاث مرات كتلة الشمس - ليست الكتلة الأصلية ولكن بعدما وصل إلى هذه المرحلة – وبسبب جذبها الثقالي تكون ذات حجم صغير لا تتجاوز الكيلومترات في امتدادها – كما رأينا نصف قطر النجم النيترونـي – لذلك أن نجما بحجم الشمس سوف ينكمش حتى يصبح نصف قطره حولي 3 كم كثقب أسود.

لذلك النظرية المعتمدة اليوم هي نظرية النسبية العامة والتي تحوي النظرية النيوتونية. حيث تتنبأ بوجود الثقوب السوداء بأنها مكان لا يصدر عنه المعلومات للعالم الخارجي، وهو ذات الشرط اللازم من نظرية نيوتن وهو أن تزيد نسبة الكتلة لنصف القطر في حالة الجسم الكروي عن القيمة الحرجة.

لقد توصل كارل تشفازرشيلد في ديسمبر عام 1915م لحل صحيح مناسب لمعادلات النسبية العامة التي تعطي معدل تغير نصف القطر مع الزمن

$$dr/dt = c[1-2GM/rc^2] = c[1-R_s/r] \qquad (5\text{-}57)$$

التي تصف حقل الجاذبية حول كتلة منفردة في الفراغ نصف قطرها r والتي تنشأ عندما تكون الكتلة محصورة في حيز ضيق جدا، وبهذا ينقسم الفراغ حول النقطة إلى منطقتين.

عندما يخترق جسم ما المنطقة الداخلية متجها نحو مركز الثقب الأسود يتحول إلى جسيمات أولية عند وصوله؛ لشدة قوة الجاذبية، وأن الأثر المتبقي لهذا الجسم هو زيادة طفيفة في قوة حقل الجاذبية المحيط بموقع المركز، والذي يصحبه اتساع في المنطقة الداخلية للثقب الأسود.

إذن فالثقب الأسود وفق التصور المبني على النسبية العامة هو موقع في الفضاء، وليس جسماً ماديا، يحيط به مجال لقوة الجاذبية تبلغ شدته حدا لا يسمح بالتعايش السلمي مع أي شكل من أشكال المادة الكتليه

إن ما يحصل عند حواف الثقوب السوداء يشبه ما يحصل عند حواف أنبوب شفط كالمكنسة الكهربائية. حيث تكون هذه الحواف عندها قوة الامتصاص إلى الداخل على شكل دوامات. ومن هذه الحواف يستطيع العلماء التقاط بعض الفعاليات الكونية، ولكن لا يمكن مشاهدة ما بداخل هذه الحواف.

تعتبر هذه الثقوب السوداء اشد المراحل من حياة النجم إثارة وإعجازا بجاذبيتها الرهيبة التي يبتلع ما حوله، لذا بدأ البعض يطرق أبواب الخيال العلمي الذي وضع الكثير من التصورات حول الثقب الأسود ودوره في الكون وقصصا خيالية.

لذا يعتقد العلماء (أو البعض) أن الثقوب السوداء عبارة عن مقابر للنجوم وأن أغلب مراكز المجرات تحوي ثقبا أسود. فقبل بضع سنوات أعلن فريق الفيزيائيين الفلكين في جامعة كاليفورنيا أن سلوك الغازات التي تدور في مركز المجرة توضح أنها تدور حول ثقب هائل الكتلة حيث أن حافته الداخلية تدور بسرعة أكبر من الحافة الخارجية التي تشير الحسابات أن هناك كتلة غير مرئية في نواة المجرة لا تقل عن 4 ملايين كتلة شمسية وفجوة

إن المواد التي يجذبها الثقب الأسود وتدخل بداخله سوف تزيد من كتلته، وأن عملية الابتلاع لأي جسم كوني كبير يصاحبه ضجيج في الموجات الكهرومغناطيسية عند اندفاعه نحو الداخل.

إن وضع الثقب الأسود لا يؤهله لإرسال أية معلومة مهما كانت طبيعتها لكي يتسنى لنا الكشف عن وجوده فعليا. لذلك من خلال تأثير جاذبيته على الوسط المحيط به يمكن التعرف عليه.

لذا يعتقد الفلكيون، إذا كان الثقب الأسود عضواً في نظام ثنائي مادام النجم المرئي بقي بعيد عن أفق الحدث وعلى مأمن من أن يجذب أو يبتلع من قبل الثقب الأسود، فان تأثيره على النجم المرئي كتأثيره النجم النيتروني على النجم المصاحب. فالخطوة الأولى، إذا حصلنا على ينجز حركته الدورانية حول زميله غير المرئي فإذا كانت المادة ترى منطلقة من النجم المرئي حتى لا يلبث مشهد اندفاع المادة إن ينقطع الذي يفترض بأن زميله غير المرئي هو ثقب أسود، واختفاء المادة اثر دخولها أفق الحدث. فإذا رصدنا الحركة الدورانية للنجم المرئي وحددنا كتلته لأمكننا حساب كتلة النجم غير المرئي، فإذا تجاوزت الكتلة المحسوبة 5M⊙ أو 10M⊙ لتوصلنا إلى الاستنتاج أنه ثقب أسود.

والخطوة الثانية، أن المادة المنطلقة من النجم المرئي المكونة بشكل رئيسي من ذرات متسارعة لن تدخل مباشرة في النجم غير المرئي بل ستلتف حوله مكونة قرصا يدوم وسترتفع درجة حرارة المادة تصل حوالي مليون درجة مئوية (حيث تكون الأجزاء الداخلية للقرص عند حافة الثقب الأسود سريعة جدا وترتفع درجة الحرارة لعشرات الملايين من الدرجات الحرارية)، وذلك بسبب الارتطام المتتالي لمزيد من الكتل الغازية المنهمرة من النجم المرئي بشكل مستمر فان القرص يصدر فيضا من الأمواج الكهرومغناطيسية القصيرة (الأشعة السينية والأشعة فوق البنفسجية وأشعة غاما) من محيط أفق الحدث، وأن هذا القرص يخفي في ثناياه الثقب الأسود. ولكن يصعب التفريق بين الحالتين التي يصعب تحديد

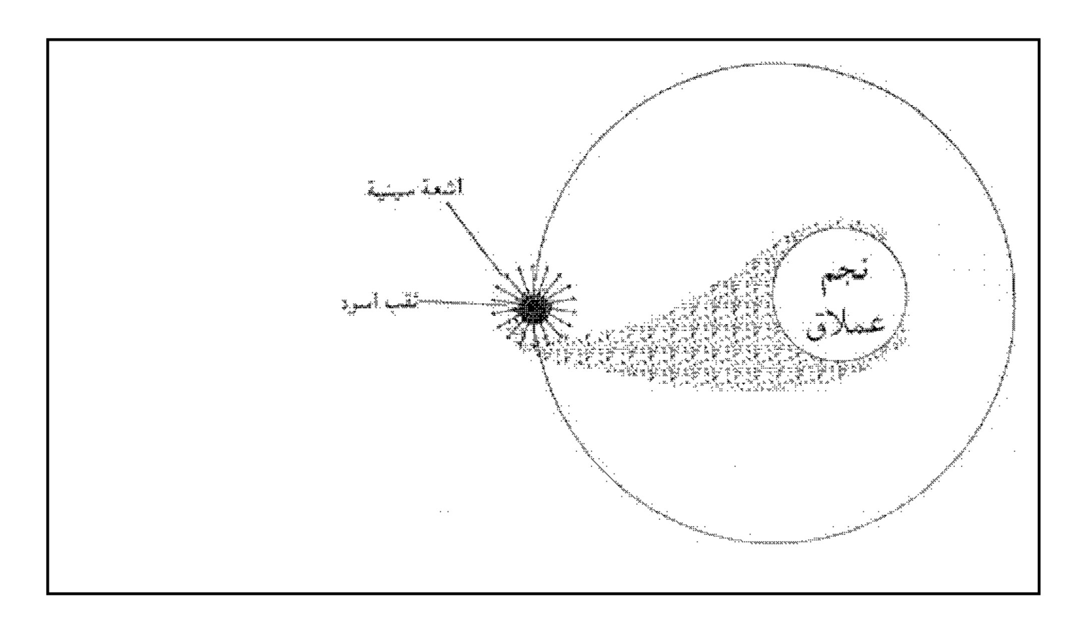
ويمكن التعبير عن ذلك رياضياً ، إذا فرضنا أن جسم كتلته M ونصف قطرة R ، وأن معدل تذايدة حول الثقب الأسود هو dm/dt في الثانية. فإن طاقة الجاذبية الناتجة تعطى بـ

$dE_{grav}/dt = (GM/R)(dm/dt)$ (5-58)

وإذا كانت كل هذه الطاقة تتحول إلى إشعاع (أي بكفائه 100%) فإن هذا يكافئ نورانية الجسم L، وإذا كان $L=10^{30}$ joul/sec و $M=M\odot$ و R=10 km فإن

$L=(GM/R)(dm/dt) \Rightarrow dm/dt = RL/GM = 7.5x10^{13}$ kg /sec $= 10^{-9}M\odot$/year (5-59)

إن الذي أدى بربطها بالنظم الثنائية، ذلك عندما أرسلت المركبة الفضائية الفلكية "أورو" من الساحل الكيني في نهاية عام 1970م التي اكتشفت نهاية نشاطها في مارس عام 1973م أكثر من 300 مصدر إشعاع سيني، وربطت العديد منها بنظم نجمية ثنائي – حولي 60% النجوم على شكل ثنائي. ويعتقد أن عددا كبيرا من المراكز المشعة سينيا عبارة عن أجرام خامدة وغير
مرئية والتي صنفت أقزاما بيضا أو نجوما نيوترونية.لقد كشفت الأرصاد الفلكية مشابه لهذا النموذج النظري منها النجم المعروف إكس-1 (X-1 Cygnus) في برج البجعة (الدجاجة) وسمي بذلك لأنه أول مصدر للأشعة السينية اكتشفت في هذه الكوكبة – التي تزخر بذلك الأشعة. فمن الأشعة السينية والضوئية
الواردة منه فانه يبعد حوالي 7000 سنة ضوئية
عن شمسنا، وهو نجم مزدوج، ونصف قطره لا
يزيد عن300 كم، وكتلته لا تقل عن 3M⊙ ولا تزيد عن 10M⊙، ويبدو النجم المرئي فيه عملاقا هائل يعتقد كتلته بين M⊙ (15-30) وتقترب درجة حرارته من ألف مليون درجة مئوية. وأن الطيف السيني المحسوب على افتراض أنه ثقب أسود يتفق مع الطيف المشاهد لذا يمثل هذا المصدر أول ثقب أسود مكتشف.

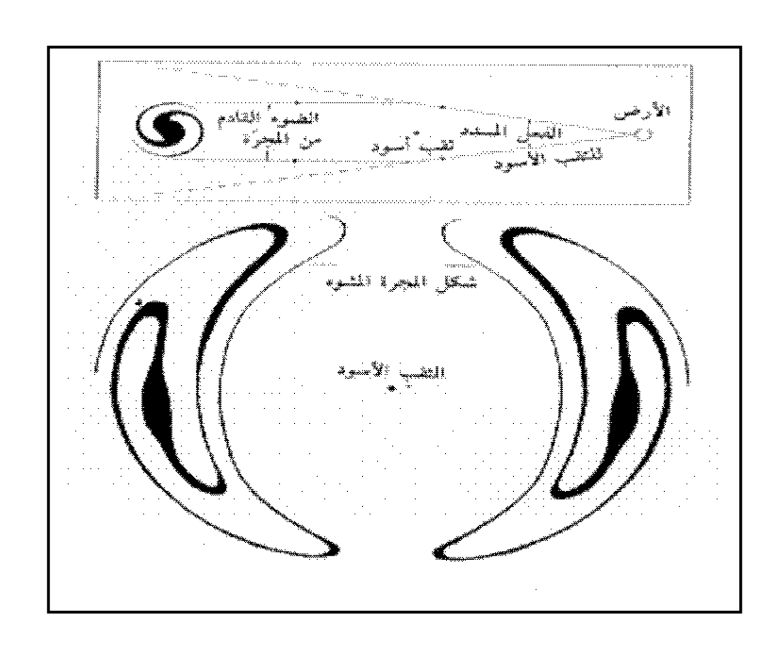


الشكل (5-10): يبن كيف إذا سار نجم عملاق وجذبه ثقب
أسود مع صدور أشعة سينية منه.

أيضا هناك حالة أخرى في سحابة ماجلان الكبيرة (LMC) حيث أن النجم المرئي نجم عادي من نجوم التتابع الرئيسي يدور حول القرص المصدر للأشعة السينية مرة كل 1.7 يوم. وأن كتلة هذا القرص تقع في المجال من 6M⊙ إلى 14M⊙. الجدول التالي.

خمسة ثقوب سوداء مرشحة

الجسم	الموقع	النجم المصاحب	الفترة المدارية	كتلة الجسم المدمجة
دجاجة X-1	كوكبة الدجاجة (البجعة)	عملاق فائق النوع O	5.6 يوم	6- 11M⊙
LMC X-3	كوكبة أبو سيف	التتابع الرئيسي النوع B3	1.7 يوم	M10⊙
A0620-00	كوكبة وحيد القرن	التتابع الرئيسي النوع K	7.752 ساعة	أكثر من M 3.18⊙
دجاجة V404	كوكبة الدجاجة	التتابع الرئيسي النوع G- K	6.47 يوم	أكثر من M 6.26⊙
متجدد الذبابة1991	كوكبة الذبابة	التتابع الرئيسي النوع K	10.4 ساعة	أكثر من 3.1 M⊙



االشكل (5-11): ظاهرة العدسات التثاقلية بالنسبة للمجرة.

هناك ظواهر كونية فريدة يعتقد سببها الثقوب السوداء، فمثلاً الانبعاث للأشعة تحت الحمراء من نوى بعض المجرات، والاضطرابات الثقالية الواسعة المدى في مركز مجرتنا. أيضا ظاهرة العدسات الثقالية حيث يلعب الثقب الأسود دور عدسة هائلة تسدد الضوء القادم من المجرة وهذا يشوه المجرة مما يغير الشكل الأصلي للمجرة. لذا قد نرى المشاهد الكونية الكثيرة مغايرة للحقيقة. يوضح الشكل التالي آلية حدوث
هذه الظاهرة الشكل (5-11).

هنا فكرة مفادها أن الثقب الأسود يعكس مسار الضوء الذي صدر من نجم بعيدا جدا عنه حين يقرب هذا الضوء من الثقب الأسود وبذلك يعطينا الصورة للنجم عندما يمر عليه من مسافات كبيرة جدا ؟!!.

أيضا كيف يتسنى لنا قياس قوة الجاذبية للثقب الأسود ؟.

توجد محاولات لمعرفة قوة الجاذبية للثقب الأسود عن طريق انحراف الضوء المار بالقرب منه أو تأثيره على النجم المرئي وحساب سرعة الثقب الأسود في مداره.

ولكن كيف نستطيع أن نحدد انحراف الضوء هو بسبب الثقب الأسود أم بسبب المجرات الموجود بيننا وبين مصدر الضوء .

إن غالبية حياة النجوم ستكون في الثقوب السوداء . لذا أين المادة التي انتقلت إليه من نجم مرئي التي سوف تزيد من كتلته حتما ؟!.

فإذا سار مسبر ضخم باتجاه الثقب الأسود لتوقف عن إرسال المعلومات حين بلوغه أفق الحدث ولاختفى من ساحة الكون كليا. إذن ما مصير هذا المسبر الفضائي ؟!.

لذا لا يمكن أن تكون الثقوب السوداء نهايات لمادة الكون. ومن البديهيات العلمية أن لكل حالة في الطبيعة أو الكون حالة أخرى مضادة لها، كالقطب الشمالي والجنوبي في المغناطيسية، والموجب والسالب في الكهربية. أيضا نعلم أن من قانون حفظ الطاقة أن المادة لا تفنى لا على الأرض ولا في السماء وبناءاً على ذلك فان هناك حالة مضادة للثقب الأسود.وإذا لم يكن كذلك، فإننا نرى السماء تزخر بخلق جديد ذات رسم طبيعي من خالق مبدع أخاذة كحشد الثريا – الذي هو أقرب مثال – لذلك مثلما نجهل مصير المادة المختفية في الثقوب السوداء، كذلك نجهل كيفية ومكان خلق تلك المادة المنبعثة من جديد والتي تسمى مخارجها بالثقوب البيضاء(White Holes).

ويخمن بعض العلماء أن الثقوب السوداء ما هي إلا مخارج إلى أكوان أخرى طفلة – أي أن الثقوب السوداء حافة الكون المرئي – بينما ذهب فريق آخر إلى أن المادة المختفية هي تمثل الظهور في كوننا – ربما في نوى النجوم والمجرات – عبر ما يعرف بممرات آينشتاين – روزين وهي عبارة عن ممرات تربط الأمكنة والأزمنة بأمكنة وأزمنة أخرى.

وقد وصف هذا النوع النقيض في الكون حين قال بعض العلماء أن الجسم الكوني يترك هويته كمادة عندما يدخل الثقوب السوداء، ويستلم هويته الجديدة عندما يخرج من الثقوب البيضاء، ولكن ما يحصل في الداخل فلا نعلم (هذا قائم تحت الدراسة).

لقد تطورت خلال السبعينيات الدراسات الخاصة عن الثقوب السوداء، حيث أتى ستيفن هوكينغ وقال أن الثقوب السوداء يمكن أن توجد حتى مستوى على الجسيمات الأولية. وعلل بذلك رأيه بنظرية الكون المتمدد الذي يفترض أن الكون قد انطلق من انفجار بدئي وكانت كثافته عالية جدا – لدرجة انضغطت معها بعض الجسيمات الصغيرة - مما سمح لقوة الجذب الثقالي أن تشد أجزائها محولة إياها إلى ثقوب سوداء أخذت بالانتشار والتوزع مع تمدد الكون.

لقد طبق هوكينغ ميكانيكا الكم عام 1977م، وبين أن الثقوب السوداء قد لا تكون سوداء بالضرورة. وتخبرنا ميكانيكا أنه قد تتصرف الجسيمات الأولية بإيقاعات تخالف نواظم النظريات القديمة فقد يشع ثقب اسود بحجم البروتون كمية من الطاقة تكافئ ما يتخلف عن انفجار ضخم، بينما ما نراه حاليا عكس ذلك التي يصل امتداد كل منها حتى عدة كيلومترات.

وهناك تساؤلات تطرح حاليا، منها هل يمكن أن ينفجر الثقب الأسود بعدما أصيب بالتخمة ؟ وهل من المحتمل أتى كوننا من تفتق ثقب أسود هائل وأن نهاية الكون ستختزل يجمعه مرة أخرى في ثقب أسود ليعود ويتفجر من جديد ؟ وما هي المدة الزمنية لكي ينفجر هذا الثقب الأسود؟ فهناك تساؤلات عديدة. ولقد ظهر مصطلح منسجم مع بعض التساؤلات هو مصطلح الكون النابض، كذلك نظرية الأوتار الفائقة والنظرية الموحدة العظمى.

وخلاصة القول أن الثقب الأسود أصبح ظاهرة فلكية فيزيائية كونية مهمة يجب الأخذ بالحسبان عند تحليل أي وقائع تشاهد في الكون، ولم يعد شكلية رياضية لا تمت الواقع بصلة.

المــراجــع

أولاً المراجع العربية

1- د.مجدي يوسف أمين " **انكماش سحابة بين نجمية ممغنطة** " 1994 رسالة دكتوراه جامعة القاهرة
2- د.مجدي يوسف أمين " **تأثير الموجات الصدمية على كيمياء سحابة بين نحمية** " 1991 رسالة ماجستير جامعة القاهرة
3- د.عبد القوي زكي عياد " **الموسوعة الفلكية** " الهيئة المصرية العامة للكتاب 1990
4- د.علي موسى و مخلص الريس "**علم الفلك مفاهيمه وأسسه**" . سلسلة الكتب العلمية الفلكية الكتاب (1) . دار دمشق 1982 م.
5- د.علي موسى و مخلص الريس "**المنظومة الشمسية** ". الكتاب الثاني الطبعة 1403 هـ - 1983 م . دار دمشق
6- د.علي الأمير "**الكون العميق** " سلسلة كتب شهرية تصدر عن دار الشئون الثقافية العامة في بغداد الطبعة الأولى 1986 م.
7- فايز فوق العادة" **علم الفلك وفلسفة النسق الكوني**" ط . الطبعة الأولى 1992 م. الكويت / مؤسسة الكويت لتقدم العلمي.
8- جوبراندات ، ستيفن ماران. ترجمة / أحمد حسين سلامة، د.ممدوح إسحاق ونس." **آفاق جديدة في علم الفلك**".
9- سير هربرت سبنسر جونز . ترجمة : د. عبدالحميد سماحة ، إبراهيم حلمي عبدالرحمن. " **الفلك العام**
10- كارولين كولنز بيتر سون ، جون سي.براندت من جامعة كولورادو. ترجمة / د. مصطفى إبراهيم فهمي. "**رؤية هابل (Hubble Vision) علم الفلك بالتلسكوب الفضائي هابل**". الطبعة الأولى 1998 م : منشورات المجمع الثقافي – أبو ظبي.
11- د.محمد صالح النوري " **الفلك**". 1996 م/1997 م. مطبوعات جامعة الإمارات العربية المتحدة – كلية العلوم.

12- باتريك موور. ترجمة : مركز التعريب والبرمجة"**موسوعة جينيس في علم الفلك**". الطبعة (4) 1994 م الدار العربية للعلوم.
13- عبدالوهاب سليمان الشراد "**الموسوعة العلمية الفلكية**". (1989-1990)م
14- مجلة "**العلم**" المصرية : تصدرها أكاديمية البحث العلمي والدار التحرير للطبع والنشر. العدد 232 . يناير 1996م. صفحة 7, 43,42.
15- مجلة العلوم السورية. المجلد 1 . العدد 2 ديسمبر (كانون الأول) عام 1986م.
16- محجوب عبيطة "**الثقوب السوداء**".العلوم والتقنية مجلة علمية تصدرها مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية. علم الفلك الجزء الأول. السنة 6 ، العدد 23 ، من رجب 1413 هـ - يناير 1993 م.
17- د. مجدي يوسف " **مادة ما بين النجوم**" مجلة الكويت عدد شهر ديسمبر 1999م.
18- د.مرفت السيد عوض ، د. مصطفى كمال محمود "**علم الفلك العام** "دار الفكر العربي ، القاهرة 2000 م
19- د. محمد الدغمة ، د. علي جمعه " **الفيزياء النووية** "الجزء الثاني، مكتبة الفلاح الكويت 1997 م
20- د. ليلى محمد سليم " **الطيف**" وزارة التعليم العالي والبحث العلمي جامعة الموصل 1985
21 – دينال موشية "**علم الفلك ، دليل التعلم الذاتي**" ، تعريب : سعيد محمد الأسعد .
22 – بهجة المعرفة ، الكون ، المجموعة الأولى ، دار المختار للطباعة والنشر ، جنيف – سويسرا .
23- فياض النجم و حميد مجدول " **فيزياء الجو والفضاء**" وزارة التعليم العالي العراقي 1982

ثانياً المراجع الأجنبية

1- **Optical Astronomical Spectroscopy** by Kitchin C.R. 1995.Institute of physics publishing . Bristol and philadelphia
2- **Fundamental Atronomy** by Karttunen H., Kroger P., Oia H., Poutanen M., Donner K.J. 1994. Springer-Verlag Berline Heidlberg. Germany.

3- **Exploration of the Universe**. by : George O.Abell , David Morrison , Sidney C. Wolff (Director) . 6th edition , 1993 Version
4- **Astronomy and Astrophysics** by Zeilik G. 1998. Saunders college publishing
5- John,S. Lewis 1995. " **physics and chemistry of the solar system**". Academic press INC
6- **Astrophysical Formulae** by Kenneth R.Lang , ,Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1980
7) **Exploration of the Universe**. by : George O. Abell , University of 4th edition. California, Ios angeles.
8) **Astronomy from the Earth to the Universe**. by : Jay M.Pasachoff , 4th edition , 1995 Version
9) **The Physics of Stellar Interiors**. by : V.C. reddish. 1974, Edinburg university press
10) **Horizons : Exploring the Universe** . by : Michael A.Seeds , 1995 Edition. Joseph R.Grundy Observatory Franklin and Marshall Collage
11) **Collins : Dictionary of Astronomy** . Edition by Valerie Illingworth , (1993-1994).
12) The Magazine " **Astronomy**" , November 2000 Vol. 28 , No. 11. page 64.
13)Uffe Grae Jorgensen " **Cool Stars Model** " . E.F. van Dishoeck (ed.), Molecules in Astrophysics : Probes and Processes. 1997 IAU No. 178
14) **An introduction to modern stellar astrophysics** byOstti A. and Carrd B.W. 1996. Addison wesly company
15) Cox, A.N. and Tabor 1976. Astrophysical journal, vol. 31, p.271
16) **Astrophysics : Stars and Galaxies** by K.D. Abhyankar 1992. Tata McGraw-Hill Publishing company limited.
17- **The Search for Brown Dwarfs : A summary of the theory of Brown Dwarfs and the prospects for finding them,** by Stevenson D.J. 1991. Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics vol 29 pp 163-193

18- **Discovery of a cool Brown Dwarf** : The announcement of the identification of GL229B as a Brown Dwarf, by Nakajima T., Oppenheimer B.R., Kulkarni S.R., Golimowski D.A., Matthews K. & Durrance S.T. Nature Nov 30 1995
19-**Synthetic Spectra and Mass Determination of the Brown Dwarf Gliese 229B : The authors model the spectral distribution of cool Brown Dwarfs and find that they agree well with the observer spectrum of GL229B**. by Allard F., Hauschildt P.H., Baraffe I. & Chabrier G. Astrophysical Journal Letters vol 465:L123-L127 1996 july 10

20-**The near-infrared spectrum of the Brown Dwarf Gliese 229B : Observations of the spectrum of GL229B between 1 and 2.5 µm.** by Geballe T.R., Kulkarni S.R., Woodward C.E. & Sloan G.C. Astrophysical Journal Letters vol 467:L101-L104 1996 august 20
21-Discovery of the Lowest Mass Brown Dwarf in the Pleiades : Observations and a spectrum of PIZ 1 , by Cossburn M.R., Hodgkin S.T., Jameson R.F. and Pinfield D.J.. Mon. Not. R. Astron. Soc. 14 April 1997
22- **The Discovery of Brown Dwarfs** by Martin, Eduardo L., Rebolo, Rafael and Zapatero,-Osario, Maria Rosa American Scientist vol. 85 no. 6 nov/dec 1977 pp 522-529

ثالثاً مراجع الأنترنت

1- http://www.achilles.net/~jtalbot/data/elements/
2- http://www.smv.org/jims/unit.htm
3- http://csep10.phys.utk.edu/astr162/lect/index.html
4- http://www.jas.org.jo /~arabic/index.html
5- http://www.websbiggest.com/wiki-article-tab.cfm/stellar_classification
6- http://www.phys.ualberta.ca/~pogosyan/teaching/ASTRO322/milkyway_infrared.png
7-http://www.astro.washington.edu/labs/clearinghouse/lecture/pix/mwradio.jpg
8-http://rst.gsfc.nasa.gov/Sect20/galcenter.jpg
9-http://www.eastbayastro.org/2000/0800/milkyway.jpg
10-http://www.astro.soton.ac.uk/~sgtl/my_webpage/milkyway.jpg
11-http://astro.uni-tuebingen.de/~wilms/teach/xray2/xray2187_vw.png
12http://coolcosmos.ipac.caltech.edu/cosmic_classroom/multiwavelength_astronomy/multiwavelength_astronomy/images/milkyway_xray.jpg
13-http://www.mhhe.com/physsci/astronomy/arny/instructor/graphics/ch15/1526.jpg
14- http://www-astro.phast.umass.edu/preprints/starform/lee/node8.html
15-http"//aa.springer.de/papers/8338001/2300209/sc2.htm